Aus der Augenklinik der Universität Tübingen
Direktor: Professor Dr. Heinrich Harms
Forschungsabteilung I für Pathophysiologie des Sehens
Leiterin: Professor Dr. Elfriede Aulhorn

DIE BEZIEHUNG ZWISCHEN SEHSCHÄRFE, PUPILLENWEITE UND TESTFELDGRÖSSE

Inaugural - Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin
einer Hohen Medizinischen Fakultät
der Eberhard - Karls - Universität
zu Tübingen

vorgelegt von

Gunter Dietrich Schöch
aus Aiud / Rumänien

1968

0568

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41547604_0032

Dissertations-Druck · Werner Blasaditsch · 8900 Augsburg · Annastraße 2

Aus der Augenklinik der Universität Tübingen
Direktor: Professor Dr. Heinrich Harms
Forschungsabteilung I für Pathophysiologie des Sehens
Leiterin: Professor Dr. Elfriede Aulhorn

DIE BEZIEHUNG ZWISCHEN SEHSCHÄRFE, PUPILLENWEITE UND TESTFELDGRÖSSE

Inaugural - Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin
einer Hohen Medizinischen Fakultät
der Eberhard - Karls - Universität
zu Tübingen

vorgelegt von
Gunter Dietrich Schöch
aus Aiud / Rumänien
1 9 6 8

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Dekan: Professor Dr. W. Graumann

1. Berichterstatter: Professor Dr. E. Aulhorn

2. Berichterstatter: Professor Dr. E. Betz

Inhalt

	Seite
Einführung und Aufgabenstellung	1
Methodik	5
1) Sehschärfeprüfung	5
2) Testfeldveränderung	13
3) Regulierung und Messung der Pupillenweite	15
4) Trennung der möglicherweise sehschärfeverändernden Faktoren	19
Versuchsablauf	20
Ergebnisse	22
Versuche mit frei beweglicher Pupille (keine Arzneimittelgabe)	22
Versuche mit konstant weiter Pupille	26
a) in Mydriasis (Mydriaticum Roche)	26
b) in Miosis (Belichtung des kontralateralen Auges)	26
Besprechung der Ergebnisse und Diskussion	31
Verhalten der Pupillenweite bei Vergrößerung des Testfeldes	31
Verhalten der Sehschärfe bei Vergrößerung des Testfeldes	33
Die Beziehung zwischen Sehschärfe, Pupillenweite und absoluter Testfeldhelligkeit	42
Schlussfolgerungen	48
Zusammenfassung	50
Literaturverzeichnis	52

Einführung und Aufgabenstellung

Bis heute sind wir nicht in der Lage die Methoden der klinischen Sehschärfeprüfung zu standardisieren, weil unser Wissen über die zahlreichen Faktoren, die das Ergebnis der Sehschärfeprüfung beeinflussen können, noch beträchtliche Lücken aufweist, die den unterschiedlichsten Lehrmeinungen Raum geben (COWAN,A. 1955 ; ten DOESSCHATE,J. 1955 ; FERREE, C.E. 1940 ; FERREE,C.E. und RAND,G. 1936 ; FISHER,M.B. 1938 ; GILBERT,M. und HOPKINSON,R.G. 1949 ; SCHOBER,H. und MUNKER,H. 1965 und andere). Nur die Kenntnis der quantitativen Wirkung aller bei der Sehschärfeprüfung ins Gewicht fallenden Größen, kann uns diesem Ziel näher bringen.

Einer der in ihrer Auswirkung noch recht umstrittenen Faktoren ist die Größe des hellen Testfeldes, auf dem die Sehzeichen dargeboten werden. Betrachtet man den ganzen Untersuchungsraum als vergrößertes Testfeld, so zeigt sich der enge Zusammenhang zwischen optimaler Testfeldgröße und günstigster Raumbeleuchtung. Da mit den heute meist gebräuchlichen Sehzeichenprojektoren sowohl im völlig dunklen Raum, wie auch bei ziemlich heller Raumbeleuchtung untersucht werden kann, hat es der Untersucher in der Hand, eine ihm günstig erscheinende Beleuchtung des Untersuchungsraumes zu wählen. Nun ist es aber, wie besonders SCHOBER immer wieder betont hat, durchaus nicht gleichgültig für das Ergebnis der Sehschärfeprüfung, welche Beleuchtung im Untersuchungsraum herrscht. Ein Einfluß der Testfeldgröße und der Raumbeleuchtung wird von den meisten Autoren angenommen; über Art, Ausmaß und Ursachen desselben gehen die Meinungen jedoch weit auseinander.

Durch Änderung der Testfeldfläche im Dunkelraum, können folgende Faktoren verändert werden:

1) Die Ausdehnung des beleuchteten Areals der Retina,
2) die ins Auge eintretende Gesamtlichtmenge,
3) die Pupillenweite.

Wird eine zusätzliche Raumbeleuchtung eingeschaltet, so ändert sich außerdem auch die absolute Leuchtdichte des Testfeldes und, bei Verwendung eines Sehzeichenprojektors, der relative Leuchtdichteunterschied zwischen Sehzeichen und Testfeld. Da wir in der vorliegenden Untersuchung nur die Wirkung der Flächenänderung erfassen wollten, haben wir das Gesichtsfeld außerhalb der Testfläche völlig dunkel gehalten.

Die drei oben genannten Faktoren sind eng miteinander verknüpft. Unter der Voraussetzung gleichbleibender Leuchtdichte des Testfeldes, ist eine Vergrößerung der Testfläche, beziehungsweise des beleuchteten Netzhautbezirkes, nur unter Vermehrung der ins Auge eintretenden Gesamtlichtmenge möglich und umgekehrt. Die Steigerung der Gesamtlichtmenge bedeutet wiederum eine Verstärkung des pupillomotorischen Reizes, verursacht also eine Abnahme der Pupillenweite. Außerdem bewirkt die Vermehrung der Lichtmenge eine Zunahme des nach dem ULBRICHTschen Prinzip im Auge gestreuten Lichtes, das einerseits die retinale Beleuchtung verstärkt, andererseits als " Schleierleuchtdichte " den Kontrast abschwächt.

Eine Auswirkung der Vergrößerung des Testfeldes auf die Sehschärfe ist folglich einmal durch die unterschiedliche Grösse der gereizten Netzhautfläche auf sensorischem Wege denkbar, da der Adaptationszustand peripher stehender Sinneszellen die Empfindlichkeit der zentral stehenden, über nervöse Verbindungen zwischen beiden, verändern könnte. Zum anderen kann die Größe des Testfeldes durch Änderung der Pupillenweite die optische Abbildung im Auge beeinflussen, und schließlich kommt als Ursache einer Sehschärfeänderung die Wirkung des Streulichtes in Betracht.

Je nachdem, welche dieser möglichen Wirkungskomponenten den entscheidenden Faktor für die Sehschärfeänderung darstellt, ergeben sich für die klinische Sehschärfeprüfung ganz verschiedene Konsequenzen. Dabei ist zu beachten, daß diese zwei grundsätzlich unterschiedliche Aufgaben hat :

1) Das Erkennen und Korrigieren eines Refraktionsfehlers. Da eine enge Pupille durch ihre Blendenwirkung Fehler des optischen Systems teilweise kompensiert, erschwert die beides. Für diesen Zweck der Sehschärfeprüfung ist deshalb eine weite Pupille wünschenswert. Will man von der Anwendung eines Mydriatikums absehen, so ist diese Forderung nur durch Verwenden eines sehr lichtschwachen oder eines ziemlich kleinen Testfeldes erfüllbar.

2) Die Sehschärfeprüfung soll über den Funktionszustand der Foveola Auskunft geben. Hierbei sind zuverlässig reproduzierbare und vergleichbare Untersuchungsergebnisse nur zu erwarten, wenn die höchstmögliche Sehschärfe des untersuchten Auges erfasst wird. Man muß also unter Bedingungen untersuchen, die optimale Voraussetzungen für das Erreichen der maximalen sensorischen Leistungsfähigkeit bieten. Sofern wir einen verbessernden Einfluß der Belichtung peripherer Netzhautteile auf die Sehschärfe des Zentrums annehmen, ergibt sich daraus die Notwendigkeit eines großen, hellen Testfeldes. Für den Fall einer wesentlichen Bedeutung der Streulichtwirkung muß die Frage nach der günstigsten Testfeldgröße zunächst offen bleiben, da wir nicht wissen, ob die positive Wirkung der stärkeren Netzhautbeleuchtung oder die negative der Kontrastabschwächung überwiegt.

Nur auf Grund der Kenntnis der quantitativen Bedeutung jedes einzelnen Faktors, läßt sich über die optimale Größe des Testfeldes etwas aussagen.

Die vorhandene Literatur gibt hierüber keine befriedigende Auskunft, obgleich zahlreiche Titel die Bearbeitung gerade dieses Problems vermuten lassen (BRAJLOWSKY,S. 1925 ; COBB, P.W. 1915 ; CRAWFORD,B.H. 1940 ; FISHER,M.B. 1938 ; FUJISAKI, S. 1959 ; HARTMANN,E. 1966 ; HAYAKAWA,K. 1938 ; HUMMELSHEIM, E. 1898 ; HUMMELSHEIM,E. 1900 ; KIKKAWA,T. 1935 ; LAPICQUE,C. 1936 ; WESTHEIMER,G. 1964 und andere) .

Bei einigen Arbeiten (BRAJLOWSKY,S. 1925 ; GLEICHEN,A. 1917 ; JAEGER,A. 1947 ; LAPICQUE,C. 1936 ; WESTHEIMER,G. 1964

und andere) , handelt es sich um rein theoretische Abhandlungen, die von physikalischen Voraussetzungen ausgehen, ohne die physiologischen Gegebenheiten des Auges und der Prüfsituation ausreichend zu beachten.

Unter unphysiologischen Bedingungen untersuchen auch diejenigen Autoren, welche vor das Auge gesetzte Lochblenden als künstliche Pupillen verwenden, um den versuchstechnischen Schwierigkeiten zu entgehen, die dem Arbeiten mit verschieden weiten natürlichen Pupillen entgegenstehen (COBB,P.W. 1915 ; FISHER,M.B. 1938 ; KIKKAWA,T. 1935 und andere). Die Auswirkung solcher Lochblenden auf den dioptrischen Apparat des Auges ist schwer zu übersehen (TONNER,F. 1943), eine Gleichsetzung mit natürlichen Pupillen entsprechender Weite ist deshalb bisher nicht möglich, und folglich können diese Arbeiten zur Lösung unserer Frage nur wenig beitragen.

Andere Autoren befassen sich nur mit der Beziehung zwischen Pupillenweite und Sehschärfe, oder der zwischen Testfeldgröße und Sehschärfe, wobei sie eine gleichzeitige Wirkung des anderen Faktors ausschliessen oder außer acht lassen (COBB,P.W. 1915 ; CRAWFORD,B,H, 1940 ; HARTMANN,E. 1966 ; HAYAKAWA,K.1938; HUMMELSHEIM,E. 1898 ; HUMMELSHEIM,E. 1900 ; KIKKAWA,T. 1935 ; SCHOBER,H. und MUNKER,H. 1965 ; TONNER,F. 1943 und andere). Zwischen den Ergebnissen dieser Arbeiten bestehen zum Teil wesentliche Widersprüche.

Die Aufgabe der vorliegenden Arbeit soll es deshalb sein, den Einfluß der Testfeldgröße auf die Sehschärfe in Art und Ausmaß zu bestimmen, und klarzustellen, welcher der oben besprochenen drei Faktoren (Belichtung peripherer Netzhautbereiche, Änderung der Pupillenweite, Streulichtwirkung) für diesen Einfluß verantwortlich zu machen ist. Falls die Untersuchung ein Zusammenwirken verschiedener Faktoren ergibt, soll der quantitative Anteil jedes einzelnen festgestellt werden.

M e t h o d i k

Eine Methodik, die unserer Problemstellung gerecht werden soll, muß folgende Bedingungen erfüllen:

1) Die Sehschärfe muß sehr genau und möglichst stufenfrei bestimmbar sein, da die zu erwartenden Sehschärfeänderungen sehr gering sein können.

2) Die Größe des Testfeldes soll in möglichst weiten Grenzen zu verändern sein, ohne daß dabei eine Änderung des Sehzeichenkontrastes, der absoluten Leuchtdichte oder sonst irgend einer Eigenschaft des Testfeldes erfolgt.

3) Die Pupillenweite sollte sich während des Versuches durch Variation der Testfeldgröße in möglichst weiten Grenzen verändern und muß in allen Phasen des Versuches ohne Störung der Untersuchung exakt messbar sein.

4) Um die Wirkung der Vergrößerung des beleuchteten Netzhautbezirkes von derjenigen der Pupillenweite zu trennen, muß eine dieser beiden Variablen konstant gehalten werden können, während die andere davon unabhängig veränderlich bleibt.

Bei einer Untersuchung wie der vorliegenden, ist es äusserst wichtig, alle Versuchsbedingungen sehr genau zu definieren und laufend unter Kontrolle zu halten, weil schon geringfügige Änderungen die Ergebnisse beeinflussen können. Da alle Faktoren, die möglicherweise eine Auswirkung auf die Sehschärfe haben, eng zusammen hängen (siehe oben) , wäre ein methodischer Fehler später kaum aufzufinden und noch weniger in seiner Bedeutung abzuschätzen.

z u 1) S e h s c h ä r f e p r ü f u n g

An eine Sehschärfeprüfung, die auch kleine Sehschärfedifferenzen aufdecken soll, sind natürlich strengere Anforderungen zu stellen als an die klinische Routinemethode. Von größter Wichtigkeit ist dabei die Wahl eines geeigneten Sehzeichens. Die üblichen Buchstaben und Zahlen scheiden von vornherein aus, da sie bei gleicher Größe untereinander nicht gleichwertig sind.

Ein gutes und bewährtes Sehzeichen ist der Landoltring, der diesen Fehler vermeidet, doch hat auch er einige Nachteile. Die Bestimmung der Sehschärfe mit dem Landoltring kann, wie die mit Buchstaben oder Zahlen, nur in relativ groben Stufen erfolgen, da wegen der großen Streuung der Ergebnisse eine feinere Abstufung der Ringgrößen nicht sinnvoll ist. Als günstigster Progressionsfaktor gilt der Wert 1,26 oder 26 % (DREYER,V. 1964). Demgemäß verwendeten wir die Stufen: 1,0 ; 1,25 ; 1,6 ; 2,0 ; 2,5 ; 3,2 . Feine Unterschiede werden von einer solchen Progression nicht mehr erfasst. Da die schrägen Einstellungen der Ringlücke den horizontalen und vertikalen nicht ganz gleichwertig sind (SCHOBER,H. 1957), können nur vier Verwechslungsmöglichkeiten angeboten werden, was eine relativ große Zahl von Darbietungen erfordert, wenn die nötige hohe Sicherheit der Ergebnisse gewährleistet sein soll (AULHORN,E. 1964).

Ein weiterer Nachteil des Landoltringes zeigte sich im Laufe der Versuche. Unter unseren Versuchsbedingungen wurden sehr hohe Sehschärfewerte erreicht; einige Versuchspersonen konnten selbst für den Wert 3,2 einen Teil der Einstellungen noch richtig angeben. Vom Wert 2,0 an machte sich jedoch zunehmend eine so starke Streuung der Ergebnisse bemerkbar, daß eine zuverlässige Aussage nicht mehr möglich war. Wir glauben, diese Streuung durch die sehr geringe Größe des ganzen Sehzeichens erklären zu können. Offenbar ist hier der Ring als Objekt so klein, daß seine Fixierung Schwierigkeiten bereitet. Darauf würde auch das Auftreten der schon von H. GUILLERY (1931) beobachteten Gestaltveränderungen und Scheinbewegungen der Sehzeichen an der Grenze der Erkennbarkeit hindeuten.

Betrachtet man die Höhe der Empfindlichkeit der Retina als räumliches Modell, so bildet sie einen Berg mit einer sehr schmalen, steilen Spitze am Orte der foveola centralis. Wahrscheinlich ist die Erkennung so kleiner Objekte, wie der Landoltringe, für Visuswerte über 2,0 nur mit dieser höchsten "Empfindlichkeitsspitze" möglich. Es ist denkbar, daß die

physiologischen Einstellbewegungen des Auges in diesem Fall zu grob sind und die "Empfindlichkeitsspitze" über das extrem kleine Objekt hinweg führen, ohne es wirklich zu erfassen. Außerdem könnte ein so kleines Objekt schon dicht neben dem Ort der höchsten Empfindlichkeit nur noch einen sehr geringen Reiz darstellen, der keinen ausreichenden Impuls für die Fixationsregelung mehr bietet, so daß eine exakte Zentrierung des Auges unterbleibt. Ein "Treffer" bliebe damit mehr oder weniger dem Zufall überlassen. Mit diesem Gedankengang läßt sich die übereinstimmende Aussage aller Versuchspersonen gut vereinbaren, daß die sehr kleinen Ringe manchmal ganz plötzlich mit voller Klarheit gesehen wurden, um gleich darauf wieder undeutlich zu werden. In diesen Fällen war auch objektiv die Angabe der Lückenstellung fast immer richtig. Ein so starker Einfluß des Zufalls läßt es verständlich erscheinen, daß die Differenz der "Trefferzahl" zwischen zwei Ringstufen in diesem Sehschärfebereich nicht dem Abstand der Visuswerte der Stufen entspricht.

Um solche Schwierigkeiten zu umgehen, suchten wir nach einem Sehzeichen, das seine Größe beibehält und dessen Sehschärfekriterium sich möglichst stufenlos verändern läßt. Wir fanden ein solches Testobjekt in einem Noniuszeiger, wie ihn zuerst E.A.WÜLFING (1892) verwendet hat, und dessen Eigenschaften als Sehzeichen von E.HERING (1899) und F.BEST (1900) näher untersucht wurden. Aus neuester Zeit liegt eine theoretische Behandlung des Noniussehens von R.RÖHLER (1962) vor. Ein Noniuszeiger besteht im Prinzip aus einer senkrechten, in der Mitte quergeteilten Linie, deren Hälften gegeneinander seitenparallel verschieblich sind. Da uns keine Arbeit über die vorteilhafteste Breite eines solchen Zeigers bekannt ist, wählten wir willkürlich als Breite 1 Winkelminute; dieser Wert gewährleistet bei guter Arbeitsraumbeleuchtung die sichere Wahrnehmung des Testzeichens. Die Verschiebung erfolgte mittels einer Mikrometerschraube. Auch mit dem Noniuszeiger ist natürlich das Einhalten von Schritten bestimmter Größe erforderlich, deren

untere Grenze durch die Streuung der Meßwerte, die Ablesbarkeit der Triebskala und die Versuchsdauer gegeben ist. Wir veränderten die Größe der Noniusverschiebung von einer Stufe zur anderen um 0,05 mm, das entspricht in der Prüfdistanz von 5 m einem Winkelwert von ca. 2". Diese Einteilung hat sich gut bewährt.

Leider sind die mit dem Noniuszeiger erhaltenen Sehschärfewerte weder mit denen des Landoltringes, noch mit Buchstaben und Zahlen vergleichbar, weil hier ganz andere sensorische Bedingungen vorliegen (HERING,E. 1899 ; RÖHLER,R. 1962). Da bei unserer Aufgabenstellung nur die Veränderung der Sehschärfe wichtig ist, nicht aber ihr Absolutwert, hielten wir diese Tatsache nicht für ein wesentliches Argument gegen die Verwendung des Noniuszeigers. Wie sich bald zeigte, hatten die mit ihm gewonnenen Sehschärfewerte eine bedeutend geringere Streuung als die der Landoltringe. Subjektiv ist die Arbeit mit dem Noniuszeiger für die Versuchsperson angenehmer und weniger ermüdend.

Bei den ersten Versuchen ergab sich eine überraschende Schwierigkeit aus den extrem hohen Absolutwerten, die unter unseren Versuchsbedingungen erreicht wurden. Selbst unter den relativ ungünstigsten Bedingungen, die wir anboten, wurden so minimale Verschiebungen des Zeigers noch erkannt (0,10 mm, entsprechend 4,1"), daß eine Verbesserung der Sehschärfe aus technischen Gründen nicht mehr zu erfassen war. (F.BEST(1900) fand Werte bis 2"). Durch einen hellgrauen Anstrich des ursprünglich schwarzen Zeigers erreichten wir eine starke Kontrastabschwächung (Leuchtdichte des Zeigers = 67 % der Umfeldleuchtdichte), und damit eine Verschiebung der Absolutwerte in einen mit unserer Einrichtung gut messbaren Bereich (0,8 - 0,2 mm, entsprechend 33" - 8,3"). Bei diesem geringen Kontrast muß streng auf das Vermeiden jeglicher Schattenbildung am Rand des Zeigers geachtet werden, da der Schatten stärkeren Kontrast hat als der Zeiger selbst und folglich irreführende Abweichungen

in Richtung höherer Sehschärfewerte verursacht.

Auch das Verfahren der Darbietung der Sehzeichen und das der Auswertung der Meßergebnisse ist für eine exakte, gut reproduzierbare Sehschärfeprüfung von großer Bedeutung. Ein einheitliches Vorgehen für alle Fälle läßt sich nicht angeben, es muß jeweils den Erfordernissen des betreffenden Sehzeichens und der ganzen Versuchsanordnung angepasst werden.

Den Landoltring zeigten wir für jede Ringgröße in 12 Einstellungen. Die verschiedenen Lückenstellungen kamen dabei jeweils gleich oft vor, jedoch in willkürlicher und ständig wechselnder Reihenfolge, so daß ein Auswendiglernen der Zeichenfolge nicht möglich war. Für jede Einstellung wurde das Sehzeichen ca. 1 sec. lang gezeigt und dann wieder verdeckt. Diese Spanne ist sicher lang genug, um eine Auswirkung des Zeitfaktors auf die Sehschärfe unter unseren Versuchsbedingungen zu verhindern (BOUMA,P.J. 1936 ; JAEGER,W. 1952 ; MONJE,M. 1949 ; ZANEN,M.J. und KLAASSEN-NENQUIN,E. 1957). Eine längere Darbietungszeit ist unzweckmäßig, da sie den Versuch unnötig in die Länge zieht und die Versuchsperson zu unerwünschten Überlegungen und "Rechenversuchen" verleitet. Die Versuchsperson mußte sich jedesmal für eine der vier möglichen Lückenstellungen entscheiden, auch wenn sie subjektiv den Eindruck hatte, diese nicht mehr richtig zu erkennen (Methode der " forced choice " , BLACKWELL, R. 1952). Bemerkenswerterweise waren die objektiven Ergebnisse fast immer besser als es dem subjektiven Eindruck der Versuchsperson entsprach.

Als sehr problematisch erwies sich die Auswertung der Meßdaten mit Landoltringen. Wie schon erwähnt, sind die möglichen Stufen der Ringgrößen zu grob, um kleine Sehschärfeänderungen zu erfassen und liefern daher zwangsläufig irreführende Kurven . Wir haben deshalb versucht, mit Hilfe des Verfahrens nach J.KATZ (1947) Zwischenwerte zu erhalten. KATZ errechnet mit einer Wahrscheinlichkeitsformel aus der Gesamtzahl der Einstellungen, der Anzahl der Verwechslungsmöglichkeiten und der

richtigen Angaben, den Anteil der wirklich erkannten Einstellungen, unter Ausschluß der eventuell richtig erratenen. Trägt man in einem Koordinatenkreuz (Abb.1), auf dessen Abszisse der jeweilige Sehschärfewert des Ringes und auf dessen Ordinate die Zahl der Einstellungen verzeichnet ist, für zwei verschiedene Ringgrößen die nach dieser Formel errechnete Zahl der richtig erkannten Einstellungen ein und verbindet beide Punkte durch eine Gerade, so hat man nach KATZ die "charakteristische Gerade" der betreffenden Versuchsperson. Eine Abszissenparallele, die den Ordinatenwert der Gesamtzahl der Einstellungen hat, schneidet die Verlängerung der "charakteristischen Geraden" in einem Punkt, dessen Abszissenwert die gesuchte "wahre Sehschärfe" angibt.

Theoretisch müßte sich die "charakteristische Gerade" bei Veränderung der Sehschärfe parallel verschieben, ihre Steigung müßte aber gleich bleiben. Tatsächlich verändert sich die Steigung natürlich mit der Streuung der Einzelwerte. Um diesen Störfaktor zu verringern, haben wir versucht, die Steigung der individuellen "charakteristischen Geraden" für jede Versuchsperson in einem einmaligen Versuch mit sehr vielen Darbietungen (72 von jeder verwendeten Ringgröße) festzulegen und mit diesem gleichbleibenden Wert jeweils von den Meßdaten auf die "wahre Sehschärfe" zu extrapolieren. Die unten mitgeteilten Landolt - Sehschärfekurven sind auf diese Weise ermittelt. Das Verfahren ist jedoch angreifbar und vor allem bei hohen Sehschärfewerten nicht beweiskräftig, weil wir fanden, daß sich die Steigung mit der Höhe der Sehschärfe systematisch ändert, und zwar wird sie um so flacher, je höher die Visuswerte liegen (Abb.2). Im Extremfall überschneiden sich die "charakteristischen Geraden" bei relativ niedriger und relativ hoher Sehschärfe der gleichen Versuchsperson in der Weise, daß der extrapolierte Wert bei hoher Sehschärfe niedriger liegt als bei niedriger Sehschärfe (Abb.2).

Extrapolieren der Sehschärfe nach KATZ

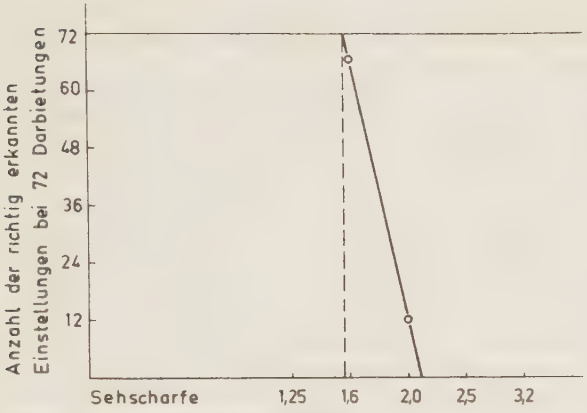

Abb. 1 : charakteristische Gerade

o ——— o Meßwerte , — — — extrapolierte Sehschärfe

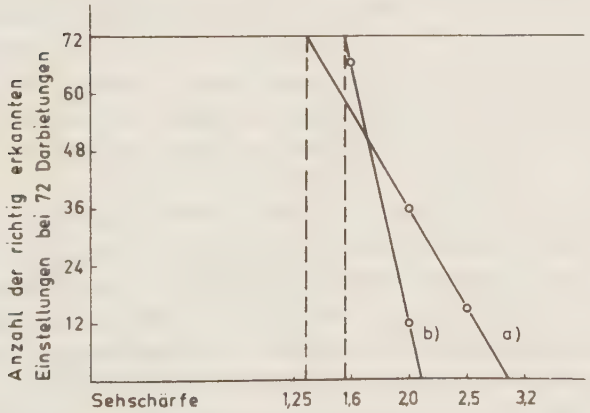

Abb. 2 : zwei charakteristische Geraden der gleichen Versuchsperson.

a) flacher Anstieg bei hoher Sehschärfe

b) steiler Anstieg bei geringerer Sehschärfe

Die extrapolierten Sehschärfewerte widersprechen den Meßwerten.

Ein so unklares und sich selbst widersprechendes Ergebnis deutet auf einen Fehler in der Methode. Er liegt vermutlich in der, aus den oben dargelegten Gründen falschen Korrespondenz zwischen den nominellen Visuswerten und der tatsächlichen Erkennbarkeit der sehr kleinen Landoltringe. Das Verfahren von KAFZ ist im Dunkelzimmer unter Bedingungen relativ niedriger Sehschärfe und folglich an großen Sehzeichen entwickelt worden. Es mag unter diesen Voraussetzungen Gutes leisten, für Bedingungen, unter denen die maximale Leistungsfähigkeit des Auges erreicht wird, ist es aber offensichtlich nicht anwendbar. Wir haben also bei Verwendung des Landoltringes in diesen Sehschärfebereichen kein Mittel, um zwischen den vollen Stufen liegende Sehschärfewerte zu erfassen. Aus diesem Grunde sind wir im Laufe der Versuche vollständig auf die Verwendung des Noniuszeigers übergegangen.

Auch beim Noniuszeiger wurden der Versuchsperson zur Prüfung der Sehschärfe jeweils 12 Einstellungen angeboten. Dabei war in 5 bis 7 Fällen die obere Hälfte des Zeigers um den Betrag der gerade geprüften Verschiebegröße nach rechts verschoben. Bei den übrigen Darbietungen stand der Zeiger in Null-Stellung. Die Reihenfolge der positiven und negativen Einstellungen war willkürlich und ständig wechselnd. Im allgemeinen wurden nicht mehr als 3 positive (beziehungsweise negative) Einstellungen hintereinander gezeigt, um die "Erinnerung" an das Bild der anderen Einstellung nicht zu schwach werden zu lassen (BEST,F. 1900), gelegentlich aber auch 4 oder gar 5 , um einen Einfluß der "Erwartung" der Versuchsperson auf das Ergebnis zu verhindern. Die Darbietungszeit von 1 sec. wurde beibehalten. Wie beim Landoltring, so war auch hier immer eine Entscheidung für eine der beiden möglichen Alternativen zu treffen.

Die Auswertung der mit dem Noniuszeiger erhaltenen Ergebnisse ist insofern einfacher als beim Landoltring, als die ausreichend feine Abstufung es gestattet, nur voll erkannte

Stufen zu werten. Jede Extra-oder Interpolation und damit auch die in ihr enthaltene Fehlermöglichkeit entfällt. Die Kurvenpunkte sind echte, direkte Meßwerte. Allerdings benötigen wir nun eine Definition von "voll erkannt". Dabei ist zu beachten, daß bei nur zwei Verwechslungsmöglichkeiten im statistischen Mittel immer 5o % richtige Antworten zu erwarten sind, auch wenn die Versuchsperson gar nichts erkennt. Andererseits wäre die Forderung völliger Fehlerfreiheit, also loo % richtige Antworten, als unphysiologisch anzusehen, da ein gelegentlicher Irrtum durchaus nicht die Grenze der Sehschärfe bezeichnen muß (DREYER,V. 1964). Wir haben als "voll erkannt" gewertet, wenn von 12 Einstellungen mindestens 10 richtig angegeben wurden, also etwas über 8o % richtige Antworten vorlagen. Die Tatsache, daß bei der nächstkleineren Stufe die Fehlerzahl meist stark zunahm, spricht für die Berechtigung dieser Grenzziehung. Prinzipiell wäre auch die Wertung von 11 oder 9 richtigen Antworten noch diskutabel, doch hätte sich damit nur der in unserem Fall unwichtige Absolutwert der Kurven geändert, nicht aber ihr für uns ausschlaggebender Verlauf. Weniger als 9 richtige Antworten zu fordern, ist sicher nicht zulässig, da diese Werte relativ häufig auch durch reines Raten zu erreichen sind.

z u 2) T e s t f e l d v e r ä n d e r u n g

Um mit möglichst einfachen Mitteln die Größe des Testfeldes ohne die geringste Veränderung seiner sonstigen Eigenschaften variieren zu können, das heißt, um die Reizfläche als isolierte Variable zu erhalten, haben wir folgenden Weg eingeschlagen: Wände und Fußboden des Untersuchungsraumes wurden, so weit das Gesichtsfeld der Versuchsperson reichte, mit weißen Tüchern abgedeckt und diese einigermaßen homogene Oberfläche gleichmässig ausgeleuchtet. Der ganze Raum war also praktisch ein großes Testfeld, in dessen Mitte das Sehzeichen angebracht war. Die Leuchtdichtedifferenz zwischen der hellsten und der dunkelsten Stelle dieses Testfeldes betrug maximal 1/10 log.Dekade, konnte also vernachlässigt werden.

Die Größe des Testfeldes wurde durch Vorsetzen von Rohren verschiedener Länge vor das untersuchte Auge verändert (siehe Abb.3). Diese Rohre waren mit schwarzem Verlourspapier ausgekleidet und mit einer Innenblende versehen , so daß alles Streulicht von den Rohrwänden abgeschirmt wurde und nur von der Öffnung des Rohres her Licht in das Auge gelangen konnte. Als Ausgangswert wählten wir einen Testfelddurchmesser von 4^{o}, der etwa dem Durchmesser des hellen Feldes der gebräuchlichen Sehzeichenprojektoren entspricht. Die weiteren Stufen hatten jeweils die dreifache Fläche der vorhergehenden. Dadurch kam eine Stufenleiter von 4^{o} / 7^{o} / 12^{o} / $2o^{o}$ / 34^{o} / 57^{o} und 86^{o} zustande. (Die Werte sind auf ganze Winkelgrad abgerundet). Die Ausgangsfläche wurde insgesamt um den Faktor 3^{o} vergrößert. Noch größere Flächen waren nicht erreichbar, weil wir dann sowohl die kreisförmige Gestalt des Testfeldes, wie auch die zentrale Lage des Sehzeichens aufgeben und damit außer seiner Grösse auch andere Eigenschaften des Testfeldes hätten verändern müssen.

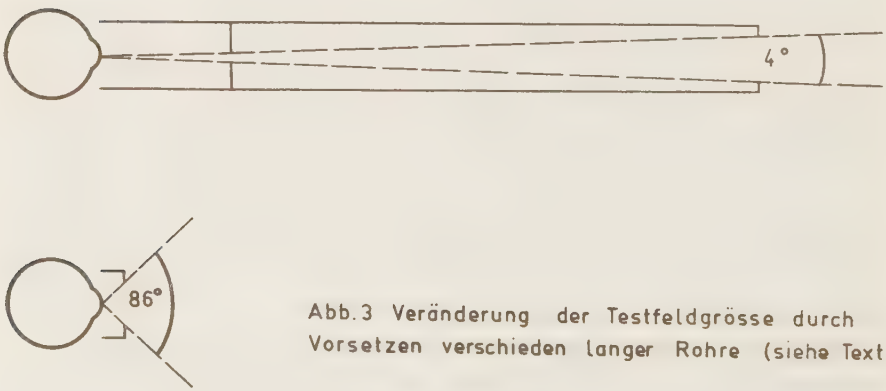

Abb.3 Veränderung der Testfeldgrösse durch Vorsetzen verschieden langer Rohre (siehe Text)

zu 3) Regulierung und Messung der Pupillenweite

Für die Pupillenweite ist neben der Größe der Reizfläche (= Testfeld) natürlich auch die Reizintensität (= Leuchtdichte des Testfeldes) entscheidend. Es gilt also, einen geeigneten Leuchtdichtebereich zu finden, in welchem sich die Pupillenweite durch die beschriebene Testfeldvergrößerung, trotz völlig konstanter Leuchtdichte, in der gewünschten Weise verändert. Zu diesem Zweck haben wir die Reizflächenveränderung bei verschiedenen Leuchtdichten vorgenommen und auf jeder Stufe der Testfeldgrößen die Pupille gemessen. Das Ergebnis zeigt Abb.4 . Die Ordinatenwerte geben jeweils den Pupillendurchmesser wieder, auf der Abszisse ist der Durchmesser des Testfeldes in Winkelgrad in logarithmischem Maßstab eingetragen.

Wie aus diesen Kurven zu ersehen ist, erfolgt bei 1 asb (Apostilb) und 10 asb praktisch keine Veränderung der Pupillenweite. Offensichtlich ist bei so niederen Intensitäten der pupillomotorische Reiz selbst bei großer Reizfläche noch unterschwellig.

Bei 100 asb sind mit großer Reizfläche bereits etwas kleinere Pupillendurchmesser zu beobachten als mit kleiner Reizfläche. Zum Studium eines eventuellen Einflusses der Pupillenweite auf die Sehschärfe ist der Effekt aber noch nicht ausreichend stark, da sowohl die Blendenwirkung, wie auch Beugungserscheinungen, vorwiegend bei sehr enger Pupille zu erwarten sind. Bei 1000 asb erfolgt mit Vergrößerung des Testfeldes von 4° bis 86° eine gleichmäßige und ausgiebige Abnahme der Pupillenweite. Die Kurven für 2000 asb und noch höhere Leuchtdichten zeigen bei gleicher Testfeldgröße geringere Pupillendurchmesser, laufen aber im übrigen der Kurve bei 1000 asb parallel.

Die Meßwerte der Kurve "über 2000 asb" sind im Freien gewonnen, da wir wegen des hohen Stromverbrauches und der starken Hitzeentwicklung der Lampen im Labor nicht mehr als 2000 asb erzielen konnten. Unter Freilichtbedingungen war aber weder

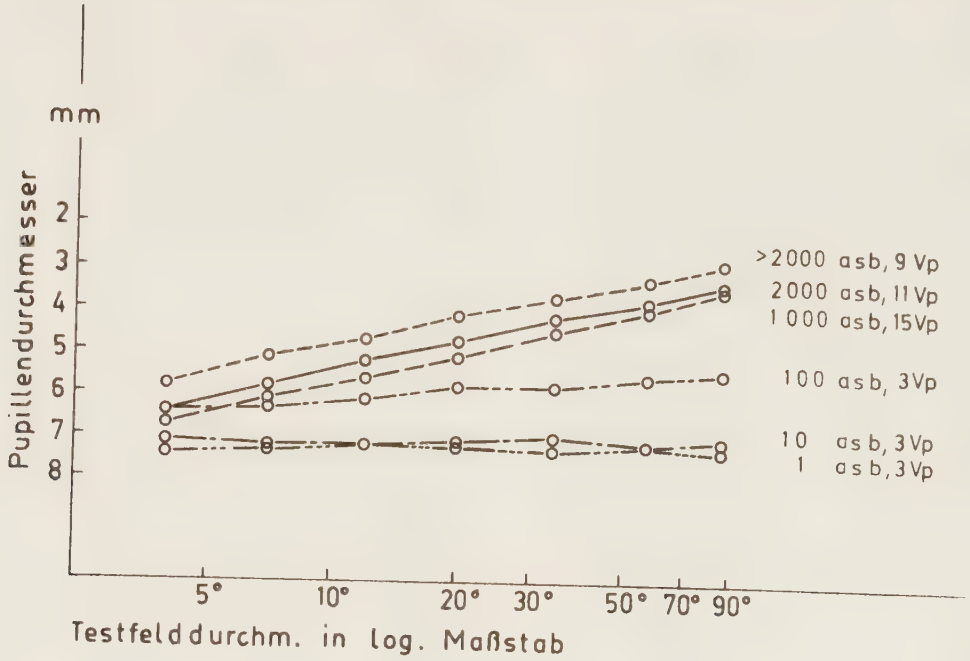

Abb. 4: Einfluß der Testfeldgröße auf den Pupillendurchm. bei verschiedenen Leuchtdichten.

eine gleichmäsige Ausleuchtung des Testfeldes, noch eine konstante Leuchtdichte zu erreichen. Die Leuchtdichtewerte lagen in unmittelbarer Umgebung des Testzeichens zwischen 7500 und 37000 asb, an der dunkelsten Stelle des Testfeldes zwischen 3000 und 12000 asb. Da es bei diesen Versuchen vorwiegend um die Pupillenweite ging, und die Leuchtdichte in unmittelbarer Umgebung des Testzeichens während eines Versuches meist in etwa gleich blieb, bedeuteten die starken Schwankungen keine wesentliche Störung der Versuche.

Wir haben auf Grund der Kurven der Abbildung 4 die meisten unserer Versuche bei Leuchtdichten von 1000 asb und darüber durchgeführt. Theoretisch müßte es eine extrem hohe Leuchtdichte geben, welche schon bei einer Testfläche von 4^{o} eine maximal enge Einstellung der Pupille verursacht. Hier wäre eine Veränderung der Pupillenweite durch Vergrößerung des Testfeldes ebensowenig möglich, wie bei sehr niederen Leuchtdichten. Solche Beleuchtungsstärken haben wir aber selbst in heller Sommersonne (37000 asb Testfeldleuchtdichte) nicht beobachtet.

Im Labor verwendeten wir als Lichtquelle Halogen-Quarz-Lampen (Fa. Osram, Nr. 64570, 220 V, 800 W.) . Die Leuchtdichtemessungen wurden mit einem photometrischen Leuchtdichtemesser nach BECHSTEIN (Fa. Schmidt - Haensch) vorgenommen.

Weil wir die Pupille des untersuchten Auges jedem Einfluß, außer dem der Testflächenänderung, entziehen wollten, haben wir das andere Auge der Versuchsperson stets dunkel abgedeckt. Eine Auswirkung des unterschiedlichen Adaptationszustandes auf die Sehschärfe des untersuchten Auges ist nach M.A.BOUMAN (1955) nicht zu befürchten. M.AGUILAR (1955) dagegen, glaubt eine deutliche Abhängigkeit der Kontrastempfindlichkeit eines Auges von der Belichtung des anderen gefunden zu haben; seine Meßdaten zeigen aber quantitativ nur geringfügige Verschiebungen. S.V. KRAVKOV (1934) fand Ähnliches wie AGUILAR. Sollte tatsächlich ein Einfluß der unterschiedlichen Adaptationszustände beider Augen bestehen und eine Fehlerquelle darstellen, so wird dieser

Fehler durch die ununterbrochene, gleichmäßige Abdeckung des einen Auges konstant gehalten. Er könnte die absoluten Sehschärfewerte beeinflussen, nicht aber deren Veränderung mit der Größe des Testfeldes.

Ein Nachteil der Abdeckung eines Auges ist die gegenüber binokularer Belichtung stets etwas größere Pupillenweite (ten DOESSCHATE,J. und ALPERN,M. 1967a; FLAMANT,F. 1948 ; REEVES,P. 1918 ; THOMSON,L.C. 1947) , die unserem Bemühen,bei großem Testfeld möglichst enge Pupillen zu erhalten, zuwider läuft.

Zur Messung der Pupillenweite benutzten wir die Blitzlicht-Photographie. Sie wird am ehesten der Forderung nach einem einfachen und zuverlässigen Meßverfahren gerecht, ohne den Fortgang der Untersuchung zu unterbrechen oder zu stören (CRAWFORD,B.H. 1937 ; PETERSEN,P. 1956).

Um bequemer arbeiten zu können und eine Irritation des untersuchten Auges durch das Blitzlicht zu vermeiden, haben wir, unter Ausnutzung der konsensuellen Reaktion, die Pupillenweite des nicht untersuchten Auges gemessen. Dagegen bestehen keine Bedenken, da die strenge Übereinstimmung der Pupillenweiten beider Augen, auch bei sehr starken Beleuchtungsdifferenzen, durch umfangreiche Untersuchungen ausreichend gesichert ist (ten DOESSCHATE,J. und ALPERN,M. 1967a ; DRISCHEL,H. 1957 ; FLAMANT, F. 1948 ; FUGATE,J.M. 1954 ; LÖWENSTEIN,O. und FRIEDMANN,E.D. 1942 ; PETERSEN,P. 1956). Sofern überhaupt meßbare Unterschiede zwischen beiden Pupillen auftreten, so ist diese geringe Ungenauigkeit sicher gegenüber den erheblichen Ausschlägen des physiologischen Pupillenspiels zu vernachlässigen (BECKER,W. 1957; ten DOESSCHATE,J. und ALPERN,M. 1967b ; SCHOBER,H. 1957). Letzteres ergibt leider einen Streufaktor, der mit den Mitteln der Momentaufnahme nicht zu erfassen ist. Wir haben deshalb bei jeder Messung zwei Aufnahmen im Abstand von mehreren Minuten gemacht und daraus den Mittelwert errechnet.

Der zeitliche Abstand zwischen Änderung der Testfeldgröße und erster Aufnahme war stets so groß (ca.1 min.), daß die

Pupillenweite inzwischen einen der neuen Reizfläche angepassten, relativ stabilen Zustand erreichen konnte (DRISCHEL,H. 1957 ; GULLBERG,J.E. und WAGMANN 1942 ; WAGMANN und NATHANSON 1942). Die Ergebnisse zeigen, daß auf diese Weise für unsere Zwecke ausreichend genaue Messungen möglich sind.

Zur Erleichterung der Auswertung ließen wir die Filme von einem Diaprojektor ca.vierfach vergrößern. Das vergrößerte Bild der Pupille wurde in zwei senkrecht aufeinander stehenden Durchmessern ausgemessen und der Mittelwert notiert. In gleicher Weise wurde die Cornea vermessen. Die Beziehung dieses Corneadurchmessers zum wahren, direkt gemessenen Corneadurchmesser gab die Relation, nach der die wahren Pupillendurchmesser aus den Messwerten errechnet werden konnten (HAYAKAWA,K. 1938). Der Hornhautvergrößerungsfaktor blieb dabei unberücksichtigt.

zu 4) Trennung der möglicherweise sehschärfeverändernden Faktoren

Um bei der Vergrößerung des Testfeldes die Wirkung der geringeren Pupillenweite von derjenigen der Vergrößerung des belichteten Retinaareals zu trennen, bietet sich als einfachste Möglichkeit die pharmakologische Mydriasis an. Nach Behandlung mit Mydriaticum Roche führten wir den Versuch unter völlig gleichen Bedingungen und in völlig gleicher Weise durch wie vorher mit unbeeinflusster, beweglicher Pupille (siehe unten).

Falls sich das Ergebnis des Versuches in Mydriasis von demjenigen mit unbeeinflusster, beweglicher Pupille unterscheidet, so muß dieser Unterschied auf das veränderte Verhalten der Pupille zurückgeführt werden.

Bei dem Versuch in Mydriasis ist die Größe des belichteten Retinabezirkes die einzige Variable. Sofern sie einen Einfluß auf die Sehschärfe besitzt, muß er in einer Veränderung der Sehschärfe während dieses Versuches zum Ausdruck kommen.

Die nach Mydriaticum Roche gleichzeitig mit der Mydriasis

auftretende Akkommodationsparese stört nicht, da bei unserem Prüfabstand von 5 m die Akkommodation praktisch keine Rolle spielt. (Bei allen nicht myopen Versuchspersonen wurde eine latente Hyperopie durch Skiaskopie ausgeschlossen). Ein Miotikum kommt zur Konstanthaltung der Pupillenweite natürlich nicht in Frage, da es einen Akkommodationskrampf verursacht. Es wäre dann eine andere Brillenkorrektur der Versuchsperson erforderlich, diese ist aber wegen der Blendenwirkung der sehr engen Pupille nicht exakt bestimmbar. Zudem ist der Akkommodationszustand unter der Wirkung eines Miotikums nicht völlig konstant.

Weil wir dennoch mit konstant enger Pupille untersuchen wollten, setzten wir das nicht untersuchte Auge einer starken Lichtquelle aus. Infolge der oben erwähnten strengen Korrelation der Pupillenweite beider Augen ist die Pupille des untersuchten Auges dann ebenfalls eng, obwohl die direkte pupillomotorische Reizung dieses Auges bei kleinem Testfeld sehr gering ist. Wegen der Wärmewirkung war es nicht möglich, diese Lichtquelle so stark zu machen, daß sie allein die Einstellung einer maximal engen Pupille hätte bewirken können. Infolgedessen verursachte der zusätzliche Reiz einer großen Testfläche auf das untersuchte Auge doch noch eine Abnahme des Pupillendurchmessers, das heißt, die Pupillenweite konnte nicht während des ganzen Versuches konstant gehalten werden. Allerdings war die Veränderung quantitativ nicht sehr bedeutend. (Etwa von 3,5 mm Durchmesser auf 3,1 mm Durchmesser) .

V e r s u c h s a b l a u f

Insgesamt untersuchten wir 19 augengesunde Versuchspersonen (9 weibl. 10 männl.) im Alter von 18 bis 30 Jahren. Darunter befanden sich 13 Myope verschiedenen Grades (Brillenkorrektur von - 0,75 dptr bis - 7,5 dptr) und 6 Emmetrope. Bei den Myopen wurde die einmal sorgfältig überprüfte Brillenkorrektur während aller Versuche beibehalten. Die Emmetropen wurden zum Ausschluß einer latenten Hyperopie in Homatropin-Mydriasis skiaskopiert.

Beim ersten Versuch wurde die Versuchsperson kurz über ihre Aufgabe unterrichtet und mit der Art der Sehschärfeprüfung und der Photoeinrichtung vertraut gemacht.

Die Untersuchung begann mit einer Blitzlichtaufnahme zur Messung der Pupillenweite. Nach Abklingen der geringen Irritation durch das Blitzlicht folgte die Sehschärfeprüfung, und nach deren Abschluß eine erneute Blitzlichtaufnahme. Danach wurde das Testfeld durch Auswechseln des Vorsatzrohres auf die nächste Größenstufe eingestellt. Nach mindestens 1 min. Wartezeit folgte wieder eine Blitzlichtaufnahme, danach die Sehschärfeprüfung und so fort bis zur letzten Testfeldstufe.

Um das Vortäuschen einer steigenden oder fallenden Tendenz der Sehschärfe durch Übung oder Ermüdung der Versuchsperson auszuschließen, untersuchten wir in orientierenden Versuchen sowohl vom kleinsten Testfeld ausgehend, wie auch mit der größten Testfläche beginnend und schließlich in völlig willkürlicher Reihenfolge der Testfeldgrößen. Auswirkungen der veränderten Reihenfolge der Testfeldgrößen auf den Verlauf der Kurven konnten wir nicht beobachten. Da die Helladaptation zusätzlich belichteter Netzhautgebiete schneller vonstatten geht als die Dunkeladaptation von der Belichtung ausgeschlossener Bezirke, wählten wir die kleinste Testfeldgröße (4^{o}) als Ausgangspunkt der Versuchsreihe und erweiterten die Fläche schrittweise bis zur größten Stufe (86^{o}).

Da die fortlaufende Prüfung der Sehschärfe ständig hohe Konzentration der Versuchsperson verlangt, sind die Versuche, besonders für weniger geübte Versuchspersonen, sehr ermüdend, und es war deshalb in der Regel nicht möglich, mit einer Versuchsperson mehr als einen Versuch pro Tag durchzuführen. Nur ausnahmsweise haben wir mit einer Versuchsperson zwei Versuche am gleichen Tag, aber im Abstand von mehreren Stunden, gemacht.

Ergebnisse

Versuche mit frei beweglicher Pupille (keine Arzneimittelgabe)

Abb.5 zeigt die Originalkurven der einzelnen Versuche bei 1000 asb Testfeldleuchtdichte. Die Sehschärfewerte sind in Abb. 5a mit dem Landoltring, in Abb. 5b mit dem Noniuszeiger ermittelt. In Abb.5c sind auf der Ordinate die den Sehschärfewerten in Abb.5a und Abb.5b entsprechenden Pupillenweiten eingetragen. Bei schrittweiser Vergrößerung des Testfeldes von 4^{o} auf 86^{o} zeigen sowohl die Landolt - Kurven, wie auch die Nonius-Kurven, einen eindeutigen, gleichmäßigen Anstieg der Sehschärfe. Die geringere Streuung der Nonius - Kurven ist gut zu erkennen. Die Pupillenmessungen ergeben eine eindeutige und gleichmäßige Abnahme des Pupillendurchmessers bei steigender Testfeldgröße.

In Abb.6 sind die Mittelwertkurven aller Nonius - Versuche bei verschiedenen Testfeldleuchtdichten dargestellt. Die Kurve bei 1000 asb zeigt die Mittelwertkurve der Einzelkurven in Abb.5. Die Darstellungsweise entspricht Abb.5. Wie man sieht, ist das Versuchsergebnis stark von der gewählten Leuchtdichte abhängig:

Bei 1 asb und 10 asb blieb die Sehschärfe praktisch unverändert, ebenso die Pupillenweite. Bei 100 asb ist eine geringe Abnahme der Pupillenweite bei großem Testfeld zu beobachten, sie hat aber keine deutliche Auswirkung auf die Sehschärfe. Die absoluten Sehschärfewerte dieser drei Kurven sind aus methodischen Gründen wohl untereinander, aber nicht mit denen der Kurven bei höheren Leuchtdichten vergleichbar. Der für jene verwendete Zeiger war bei geringen Beleuchtungsstärken nicht mehr zu erkennen, und wir benutzten deshalb in diesem Bereich einen anderen Zeiger (Breite 4', Leuchtdichte = 62 % der Testfeldleuchtdichte). Der qualitative Verlauf der Kurven bleibt davon unberührt.

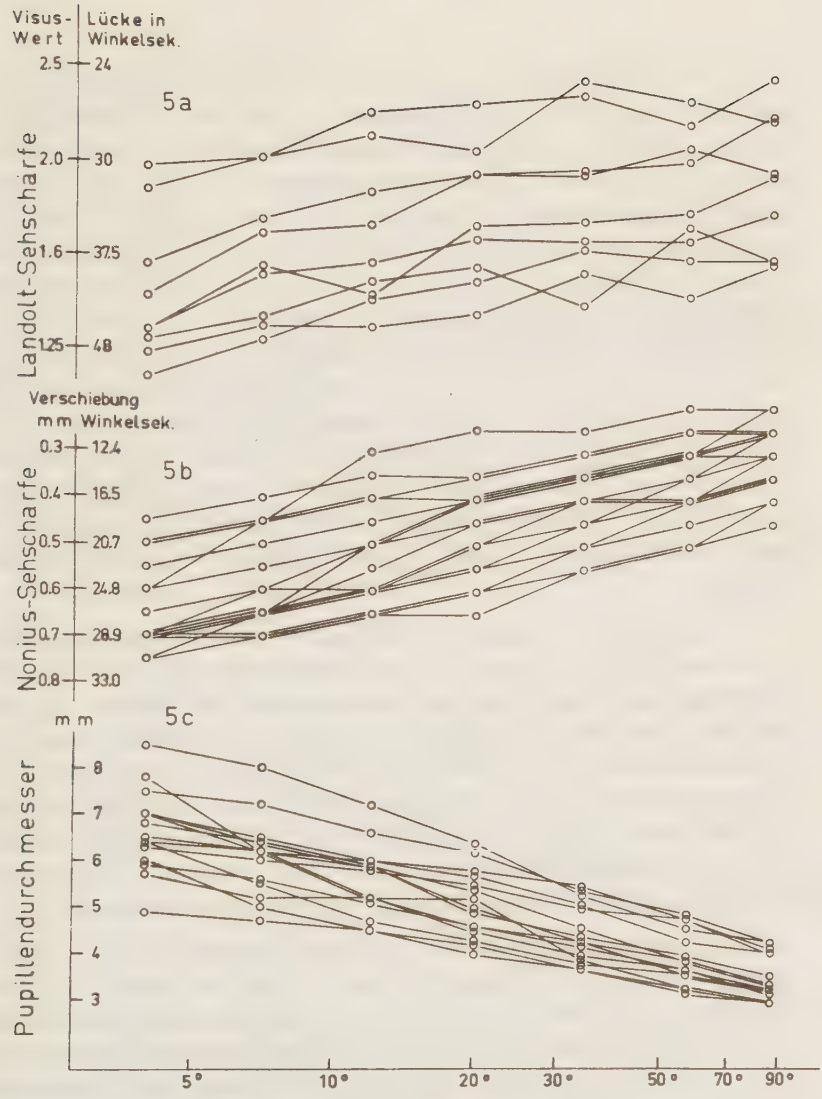

Abb. 5: Einfluß der Testfeldgröße auf Sehschärfe und Pupillenweite bei 1000 asb Testfeldleuchtdichte.
Original-Kurven verschiedener Versuchspersonen.

Bei 2000 asb verlief der Versuch zunächst genau wie bei 1000 asb, jedoch lagen die Ausgangswerte bei kleineren Pupillendurchmessern und höheren Sehschärfewerten. Im Laufe des Versuches erreichten alle Versuchspersonen bei individuell verschiedener Testfeldgröße (im Durchschnitt bei ca.25°) (siehe Abb.7) ein Maximum der Sehschärfe, welches sich trotz weiterhin abnehmender Pupillenweite nicht mehr veränderte. Die Mittelwertkurve für 2000 asb in Abb.6 erweckt den Eindruck einer asymptotischen Annäherung an den Endwert der Sehschärfe. Betrachtet man jedoch die Einzelkurven in Abb.7, so zeigen diese ein gleichmäßiges Ansteigen der Sehschärfe bis zum Maximum und biegen dann plötzlich mit einem Knick in die Horizontale um. Dieser Befund spricht dafür, daß hier tatsächlich die absolute Grenze des Auflösungsvermögens liegt. Der irreführende Verlauf der Mittelwertkurve beruht auf den individuellen Unterschieden im Verlauf der Einzelkurven.

Ganz ähnlich sind die Ergebnisse bei höheren Leuchtdichten im Freien (über 2000 asb). Die Ausgangswerte lagen bei noch kleineren Pupillenweiten und noch höherer Sehschärfe als bei 2000 asb. Das Sehschärfemaximum wurde bei kleineren Testfeldgrößen erreicht (im Durchschnitt bei ca.17°), lag aber in keinem Fall höher als bei 2000 asb. Auch diese Tatsache spricht für das Erreichen einer absoluten Grenze. Für den Verlauf der Kurve gilt entsprechend das Gleiche, wie bei 2000 asb (siehe oben). Die Pupillenweite nahm auch hier weiter gleichmäßig ab.

Um noch geringere Pupillenweiten untersuchen zu können, prüften wir 5 Versuchspersonen zusätzlich binokular mit völlig freiem Gesichtsfeld bei 2000 asb und noch höheren Leuchtdichten. Diese Pupillenweiten konnten nicht photographisch gemessen werden, da unsere Apparatur das Verdunkeln eines Auges bedingte. Messungen mit dem HAABschen Stab und dem Pupillometer nach EBBEKE ergaben bei allen 5 Versuchspersonen Pupillenweiten von ca.2 mm.

Bei allen 5 Versuchspersonen war die maximale binokulare

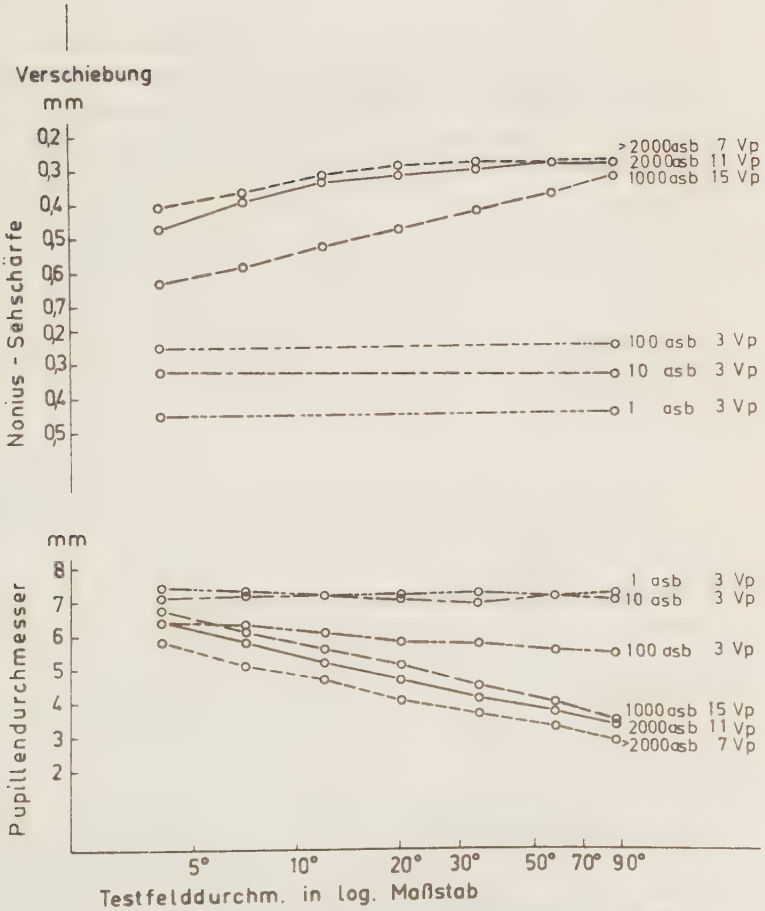

Abb. 6: Einfluß der Testfeldgröße auf Sehschärfe und Pupillendurchmesser bei verschiedener Leuchtdichte (Mittelwertkurven)

Sehschärfe genau gleich der maximalen monokularen Sehschärfe (siehe Abb.11), obgleich in letzterem Falle die Pupille immer etwas weiter war. Dieses Ergebnis war nach dem oben Gesagten zu erwarten.

Ein Wiederabsinken der Sehschärfe konnten wir in keinem Falle feststellen. Einzelne Versuchspersonen erreichten ihr Sehschärfemaximum schon bei der größten Testfeldstufe (86^{o}) bei 1000 asb. Zwei Versuchspersonen erreichten bei 1000 asb geringfügig höhere Sehschärfewerte als bei stärkerer Beleuchtung. Diese Abweichung dürfte aber innerhalb der intraindividuellen Streuung liegen, da die Kurven an verschiedenen Tagen aufgenommen wurden (siehe Abb.8, sowie HUMPHRISS,D. und ORTH,D. 1958).

Versuche mit konstant weiter Pupille

a) in Mydriasis (Mydriaticum Roche)

Das Ergebnis dieser Versuche zeigt Abb.9. Da alle Versuche in Mydriasis, unabhängig von der Leuchtdichte, bei der sie durchgeführt wurden, gleichbleibende Sehschärfe ergaben, sind die Kurven für 1000 asb, 2000 asb und noch höhere Leuchtdichten in einer Abbildung vereinigt. In keinem Fall läßt sich eine deutliche Veränderung der Sehschärfe durch Variation der Testfeldgröße nachweisen. Dies gilt ebenso für den Landoltring wie für den Noniuszeiger. Die absoluten Sehschärfewerte lagen bei der gleichen Versuchsperson, trotz unveränderter Pupillenweite, für höhere Leuchtdichten meist etwas höher, veränderten sich jedoch, wie gesagt, nicht während des Versuches. Das Absinken einzelner Nonius - Kurven bei den größten Testflächen, fiel mit der subjektiven Angabe starker Blendung zusammen.

b) in Miosis (Belichtung des kontralateralen Auges)

Wegen der unbefriedigenden Methodik (siehe S.16) machten wir nur einige Kontrollversuche in Miosis, deren Verlauf aus

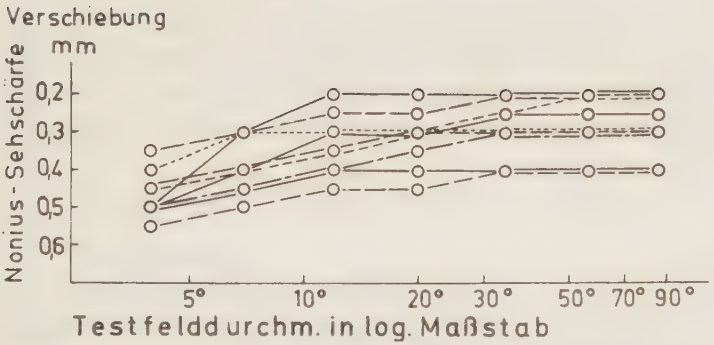

Abb. 7: Einfluß der Testfeldgröße auf die Sehschärfe bei 2 000 asb Testfeldleuchtdichte (Originalkurven versch. Vp.)

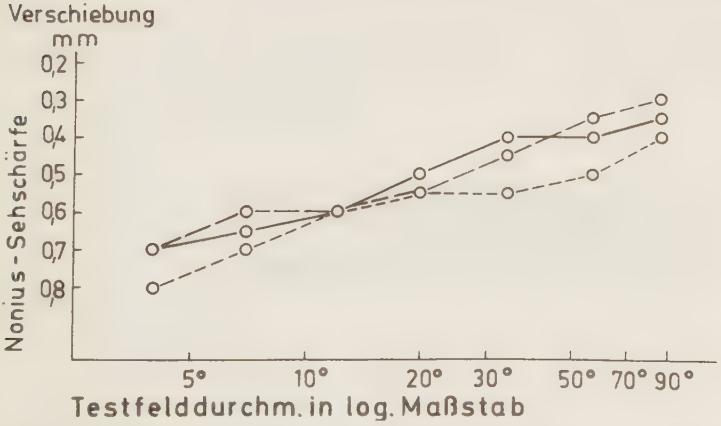

Abb. 8 · Intraindividuelle Streuung · 3 Kurven von einer Vp an verschied. Tagen aufgenommen, Testfeldleuchtdichte 1000 asb

Abb.lo zu ersehen ist. Sie unterscheiden sich grundsätzlich nicht von den Versuchen in Myuriasis. Eine Veränderung der Sehschärfe durch Vergrößerung des Testfeldes ist nicht zu erkennen. Da die Sehschärfewerte mit Landoltringen bestimmt wurden und die Absolutwerte recht hoch lagen, ist die große Streuung verständlich (siehe S.6) und auch der Verlauf der Kurve Nr.3 kann nicht als sicherer Anstieg der Sehschärfe interpretiert werden.

Anmerkung:

Bei logarithmischer Darstellungsweise der Testfeldgröße ist es grundsätzlich gleichgültig, ob sie durch die Fläche oder den Durchmesser definiert wird. Da im logarithmischen Maßstab das Quadrat nur als Faktor 2 erscheint, verhalten sich der Logarithmus der Fläche und der des Durchmessers linear zu einander, so daß es für die Gestalt unserer Kurven keine Rolle spielt, welcher der beiden Werte eingesetzt wird. Wir haben zur Definition der Testfeldgröße den Durchmesser im Winkelmaß gewählt, weil dieser von der Prüfdistanz unabhängig ist.

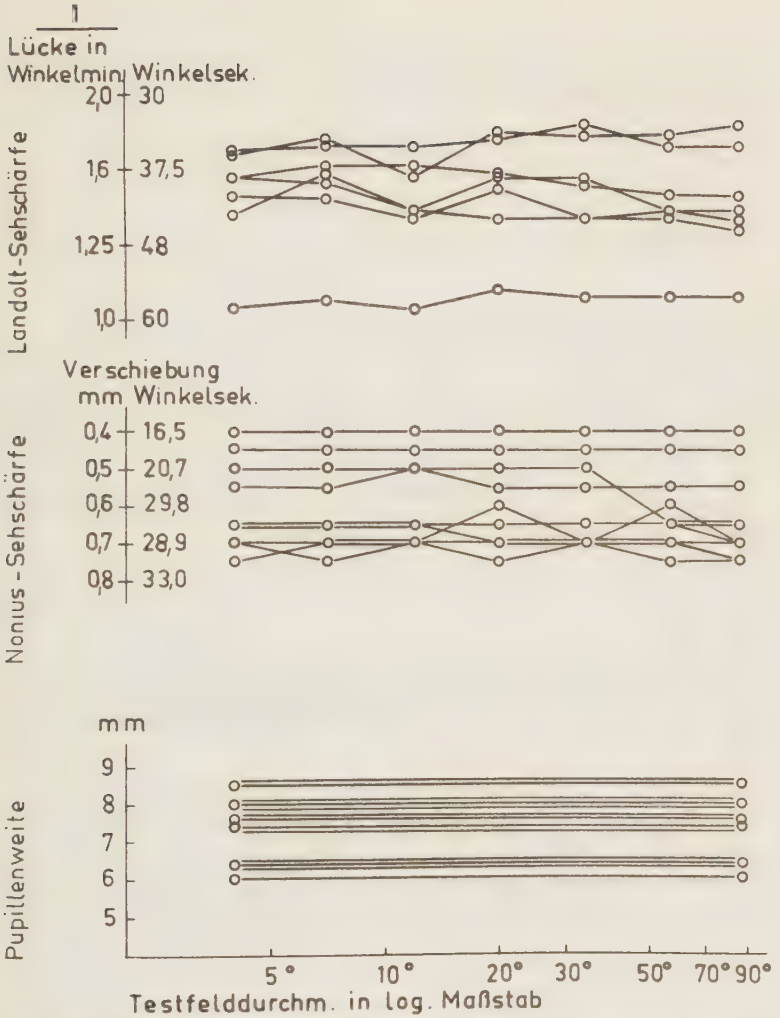

Abb. 9 : Einfluß der Testfeldgröße auf die Sehschärfe in Mydriasis bei versch. Leuchtdichte von 1000 bis > 2000 asb (Originalkurven versch. Vp.)

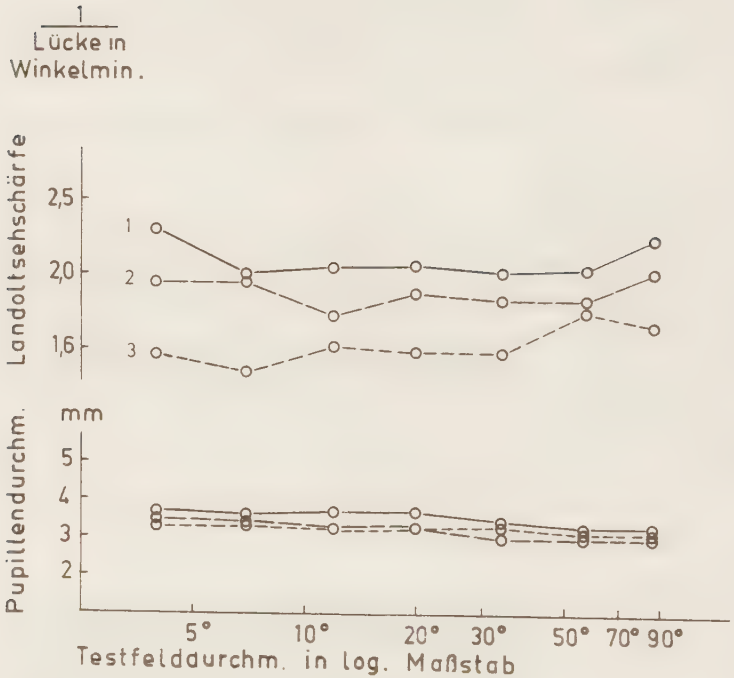

Abb. 10 : Einfluß der Testfeldgröße auf die Sehschärfe in Miosis (Originalkurven versch. Vp.)

Besprechung der Ergebnisse und Diskussion

Verhalten der Pupillenweite bei Vergrößerung des Testfeldes

Aus Abb.4, Abb.5 und Abb.6 ist zu entnehmen, daß bei Testfeldleuchtdichten von 1000 und mehr asb mit Vergrößerung des Testfeldes in logarithmischen Stufen der Pupillendurchmesser in linearen Schritten abnimmt. Wird also bei konstanter Testfeldleuchtdichte der Pupillendurchmesser gegen den Logarithmus der Testfeldgröße aufgetragen, so erhält man eine Gerade.

Bei 100 asb liegen grundsätzlich die gleichen Verhältnisse vor, die quantitative Änderung der Pupillenweite ist aber viel geringer.

Bei 10 oder noch weniger asb bleibt die Pupillenweite auch bei großem Testfeld konstant. Offenbar stellen so niedrige Leuchtdichten keinen ausreichenden pupillomotorischen Reiz mehr dar.

Ein ähnliches Verhalten wäre bei sehr hohen Leuchtdichten zu erwarten, bei denen schon sehr kleine Reizflächen eine minimale Pupillenweite bedingen, so daß eine Vergrößerung der Reizfläche keine Abnahme des Pupillendurchmessers mehr bewirken kann. So hohe Beleuchtungsstärken haben wir aber nicht erreicht.

Unsere Beobachtungen über das Verhalten der Pupillenweite bei Vergrößerung des Testfeldes stimmen gut mit den Angaben anderer Autoren überein:

Da fast alle Arbeiten über das Verhalten der Pupillenweite nicht die Ausdehnung der Reizfläche, sondern die Höhe der Reizintensität als Variable verwenden, muß zunächst eine Beziehung zwischen diesen beiden Größen hergestellt werden. Dies hat

B.H.CRAWFORD (1937) getan. Er fand, daß sich, in Bezug auf die pupillomotorische Wirksamkeit, die äquivalente Helligkeit eines konstant großen Testfeldes direkt proportional zur Veränderung der Fläche eines Testfeldes mit konstanter Leuchtdichte verhält. Mit anderen Worten: Wenn die Fläche eines Testfeldes F mit konstanter Leuchtdichte L um den Faktor x vergrößert wird, so nimmt die Pupille einen Durchmesser d an. Der gleiche Pupillendurchmesser d wird erreicht, wenn bei gleichbleibender Fläche F die Leuchtdichte L um den Faktor x gesteigert wird. J.M.FUGATE (1954) hat diese Beobachtung in neuerer Zeit bestätigt.

Es ist also für die Einstellung der Pupillenweite gleichgültig, ob die Reizintensität oder die Reizfläche verändert werden, sofern der Faktor der Veränderung identisch ist. Wir dürfen folglich die Erfahrungen der Autoren, welche nur die Reizintensität variiert haben, zur Diskussion unserer Beobachtungen bei Veränderung der Reizfläche heranziehen.

H.HARTINGER (1937) sowie auch K.HAYAKAWA (1938) und W.H. MELANOWSKY (1935) fanden eine lineare Beziehung zwischen Pupillendurchmesser und dem Logarithmus der Beleuchtungsstärke. P.REEVES (1918) dehnte seine Versuche bis zum Erreichen von Maximal-, beziehungsweise Minimalwerten der Pupillenweite aus und fand in den Grenzbereichen eine asymptotische Annäherung der Pupillenweite an die Endwerte. Der Mittelteil seiner Kurve kann, wie bei den erstgenannten Autoren, praktisch als Gerade betrachtet werden. Eine sehr ähnliche Kurve haben auch WAGMANN und NATHANSON (1942) gefunden. Die quantitative Differenz zwischen der Kurve von REEVES und derjenigen von WAGMANN und NATHANSON ist wohl auf individuelle Unterschiede der pupillomotorischen Erregbarkeit zurückzuführen, da beide nur sehr wenige Versuchspersonen untersuchten. In neuester Zeit haben J.ten DOESSCHATE und M.ALPERN (1965) die Ergebnisse von REEVES bestätigt.

F.FLAMANT (1948) fand interessante Abweichungen von den Ergebnissen aller bisher genannten Autoren. Ihre Beobachtungen sind für uns jedoch nicht von Bedeutung, da diese Abweichungen bei niedrigen Leuchtdichten auftraten. In dem für uns wichtigen

Leuchtdichtebereich stimmt ihre Kurve mit denen der angeführten Autoren und, unter Beachtung der oben genannten Beziehung zwischen Intensität und Fläche, auch mit der unseren überein.

Die Beobachtung von W. BECKER (1957), daß die Streubreite der Pupillenweite bei großem Pupillendurchmesser höher ist als bei kleinem, entspricht ebenfalls unseren Erfahrungen (siehe Abb.5c).

Auf Grund unserer eigenen Versuche und der angeführten Literaturstellen können wir Folgendes feststellen: Bei konstanter Testfeldleuchtdichte ist der Pupillendurchmesser dem Logarithmus der Testfläche umgekehrt proportional. Diese Beziehung entspricht der WEBER - FECHNERschen Regel. Sie gilt nicht für Grenzbereiche der Leuchtdichte, in denen maximale oder minimale Pupillenweiten erreicht werden.

Verhalten der Sehschärfe bei Vergrößerung des Testfeldes

Wie aus Abb.5 und Abb.6 zu ersehen ist, besteht bei unbeeinflusster, beweglicher Pupille zwischen Testfeldgröße und Sehschärfe eine Beziehung, die derjenigen zwischen Testfeldgröße und Pupillenweite sehr ähnlich ist; lediglich das Vorzeichen wechselt.

Bei Leuchtdichten bis 100 asb bleibt die Sehschärfe auch bei großen Testflächen praktisch unverändert.

Bei 1000 asb steigt die Sehschärfe in linearen Schritten, wenn das Testfeld in logarithmischen Stufen vergrößert wird. Die Mittelwertkurve aller Nonius - Versuche bei 1000 asb in Abb.6 ist eine nahezu ideale Gerade. Bei dieser Leuchtdichte ist die Sehschärfe dem Logarithmus der Testfeldgröße direkt proportional.

Die Kurven bei 2000 asb und noch höherer Leuchtdichte zeigen ein anderes Verhalten. Im Gegensatz zur Pupillenverengung erreicht die Sehschärfe hier bei großen Testflächen ihr Maximum, wir befinden uns also im Grenzbereich der Annäherung

an den Endwert. Die Kurven weichen entsprechend vom Verlauf derjenigen bei 1000 asb ab (Abb.6 und Abb.7). Nach Erreichen des Höchstwertes verlaufen sie abszissenparallel.

Wie schon erwähnt, ist bei konstant weiter Pupille (siehe Abb.9 und Abb.10) keine Veränderung der Sehschärfe durch Veränderung der Testfeldgröße von 4^{o} bis 86^{o} nachzuweisen. Bei lichtstarrer Pupille besteht folglich in diesem Bereich keinerlei Abhängigkeit der Sehschärfe von der Testfeldgröße

Dieses Ergebnis schließt einen Einfluß des bei wachsendem Testfeld zunehmenden Streulichtes im Auge aus. Theoretisch könnte das Streulicht, wie schon in der Einführung erwähnt, nach dem ULBRICHTschen Prinzip, trotz konstanter Testfeldleuchtdichte, eine Erhöhung der retinalen Beleuchtungsstärke verursachen, auf diese Weise einen günstigeren Adaptationszustand der Netzhaut bewirken und die Sehschärfe verbessern. Da es sich jedoch bei dem zusätzlichen Lichtquantum um eine kontrastvermindernde "Schleierleuchtdichte" handelt, könnte ebensogut eine Sehschärfeverschlechterung die Folge sein. In unseren Versuchen mit konstanter Pupillenweite konnten wir weder das eine noch das andere beobachten. Das spricht nicht unbedingt gegen die Wirksamkeit solcher Streulichtfaktoren. Sie könnten beide vorhanden sein, sich aber gegenseitig aufheben. Hätten wir nur mit konstant maximal weiter Pupille untersucht (Abb.9), so könnte man einwenden, das Gleichgewicht dieser gegensätzlichen Streulichtfaktoren bestehe nur in Mydriasis und verschiebe sich bei enger Pupille zugunsten der sehschärfeverbessernden Adaptationswirkung. Der beobachtete Sehschärfeanstieg wäre in diesem Falle nicht nur von der Pupillenweite, sondern auch von der Testfeldgröße abhängig. Die Kurven der Abb.10 lassen jedoch eine solche Deutung nicht zu, da sie auch für konstant enge Pupillen das Fehlen einer Sehschärfesteigerung bei Vergrößerung der Testfläche beweisen.

Dies bedeutet aber, daß sich unter unseren Versuchsbedingungen die Auswirkungen der Streulichtvermehrung im Auge, sofern sie überhaupt nennenswerte Bedeutung haben, in jedem Falle

aufheben und im Endeffekt keinen sehschärfeverändernden Einfluß besitzen

Auch eine Wirkung der Belichtung peripherer Netzhautbereiche auf die Sehschärfe des Zentrums wird durch das Ergebnis der Versuche mit konstanter Pupillenweite ausgeschlossen. Wäre die Vergrößerung des belichteten Retinaareals entscheidend, so hätte in Mydriasis bei Vergrößerung des Testfeldes eine eher stärkere Verbesserung der Sehschärfe eintreten müssen als bei beweglicher Pupille, da in ersterem Falle die Intensitätsminderung der retinalen Beleuchtungsstärke durch eine engere Pupille bei großer Testfläche entfällt.

Diese Schlußfolgerung aus den vorliegenden Versuchen entspricht den Ergebnissen von H.HARMS und E.AULHORN (1955), welche die Lichtunterschiedsempfindlichkeit eines bestimmten Netzhautortes vom Adaptationszustand benachbarter Netzhautorte, abgesehen von einem schmalen Grenzbereich von höchstens 1^{o}, völlig unabhängig fanden.

Von den in der Einführung genannten drei Faktoren, welche als Ursache für die Sehschärfeverbesserung bei Vergrößerung des Testfeldes in Frage kommen, haben sich damit sowohl die Belichtung peripherer Retinabezirke, wie auch das Streulicht als unwirksam erwiesen. Folglich muß der beobachtete Anstieg der Sehschärfe allein durch die Veränderung der Pupillenweite verursacht sein. Ein großes Testfeld hat eine enge Pupille zur Folge (siehe S.33 und Abb.6). Diese wirkt als Blende und verkleinert den Zerstreuungskreis, der auch beim emmetropen Auge, infolge der mangelhaften optischen Eigenschaften der brechenden Augenmedien, stets vorhanden ist. Die dadurch verbesserte Abbildung verursacht eine Steigerung der Sehschärfe. Sobald das Auflösungsvermögen des Sinneszellrasters voll ausgeschöpft ist, kann eine weitere Verbesserung der Abbildung nicht mehr verwertet werden. Folglich bleibt die Sehschärfe von hier ab konstant, auch wenn die Pupille noch enger wird.

Wir schließen aus den vorliegenden Befunden, daß die Testfeldgröße nur insofern einen Einfluß auf die Sehschärfe besitzt, als sie bei gegebener Leuchtdichte die Weite der Pupille bestimmt.

Dies gilt jedoch nicht ohne Einschränkung, wenn das Testzeichen nur wenig kleiner ist als das Testfeld, oder der Testfelddurchmesser absolut gesehen sehr klein wird. In diesem Falle tritt unter Umständen der sogenannte Grenzkontrast als sehschärfeverschlechternder Faktor in Erscheinung. Er zeigt sich subjektiv in einer, auch als MACHsches Phänomen bezeichneten, typischen Empfindung der Helligkeitsverteilung in der Randzone zwischen hellen und dunklen Flächen, die von der physikalischen Lichtverteilung abweicht. H.HARMS und E.AULHORN (1955) haben in diesem Grenzbereich eine echte, erhebliche Herabsetzung der Lichtunterschiedsempfindlichkeit nachgewiesen und als Hemmungsvorgang gedeutet. Die Hemmung ist umso stärker, je größer der Leuchtdichteunterschied zwischen heller und dunkler Fläche ist, und je höher die absolute Leuchtdichte liegt. Diese " Störzone" kann bis zu 1^{o} breit werden (AULHORN,E. und HARMS,H. 1956). Eine Senkung der Lichtunterschiedsempfindlichkeit kann für die Sehschärfe nicht gleichgültig sein. Im Einflußbereich des Grenzkontrastes ist daher mit einer Herabsetzung der Sehschärfe zu rechnen.

Bei einem Testfeld von 4^{o} Durchmesser haben wir selbst bei hoher Leuchtdichte (2000 asb) keine Beeinträchtigung der Sehschärfe für ein wenige Winkelminuten großes Testzeichen im Zentrum dieser Fläche festgestellt. Bei 2^{o} Durchmesser ist die Sehschärfe jedoch bereits deutlich herabgesetzt, wie wir bei Versuchen, die wir in anderem Zusammenhang durchführten, nachweisen konnten. Die Testfeldgröße, bei welcher eine derartige Störung auftritt, ist natürlich auch von der Ausdehnung des Sehzeichens abhängig, da der Abstand zwischen Sehzeichen und Testfeldrand die entscheidende Größe darstellt. Außerdem finden sich bei verschiedenen Versuchspersonen individuelle Unterschiede.

Unsere Beurteilung der Bedeutung der Testfeldgröße deckt sich mit den Ergebnissen von C.A.P.FOXELL und W.F.STEVENS (1955), welche bei Testfeldern von 6^{o} bis $12o^{o}$ keinen Einfluß der Testfeldgröße auf die Sehschärfe fanden, wohl aber im Bereich von $0,5^{o}$ bis 6^{o} . Auch M.B.FISHER (1938) kommt zu dem gleichen Ergebnis, ebenso B.H.CRAWFORD (194o). Letzterer fand von 3^{o} bis $6o^{o}$ keinen Einfluß der Testfläche, stellte jedoch unter 3^{o} "complex effects" fest. Er schloß daraus: "at the fovea there is no appreciable integrative effect". Allerdings hat CRAWFORD nicht Sehschärfe sondern Lichtunterschiedsempfindlichkeit untersucht.

Die Grenzkontrastwirkung erklärt wahrscheinlich auch den scheinbaren Widerspruch zwischen unseren Ergebnissen und denen von E.HUMMELSHEIM (1900) . Er prüfte in pharmakologischer Mydriasis und Miosis an einem Testfeld konstanter Helligkeit bei wechselnder Umfeldleuchtdichte (maximale Umfeldleuchtdichte = Testfeldleuchtdichte). Obwohl eine Veränderung der Pupillenweite ausgeschlossen war, fand er, im Gegensatz zu uns, einen quantitativ nicht sehr großen, aber doch deutlichen Anstieg der Sehschärfe bei höheren Umfeldleuchtdichten sowohl in Mydriasis wie auch in Miosis. (Die Sehschärfewerte in Miosis lagen allerdings immer höher als in Mydriasis, was wiederum unseren Ergebnissen entspricht). Aus diesem Befund schloß HUMMELSHEIM, die periphere Helligkeit müsse Ursache der Visusverbesserung sein, und folglich bestehe ein Einfluß der Belichtung peripherer Netzhautbezirke auf die Sehschärfe des Zentrums. Seine Versuchsergebnisse legen diesen Schluß nahe, sie sind aber irreführend.

HUMMELSHEIM untersuchte an einem Testfeld mit $2^{o}18'$ Durchmesser. Bei dunklem Umfeld, also großem Leuchtdichteunterschied zwischen Testfeld und Umfeld, sind in dieser Versuchsanordnung mit Sicherheit Störungen durch den, HUMMELSHEIM unbekannten, Grenzkontrast zu erwarten. Mit Aufhellung des Umfeldes wird der Leuchtdichteunterschied zwischen Testfeld und Umfeld geringer, die Wirkung des Grenzkontrastes sinkt und wird gleich Null,

sobald Umfeld und Testfeld gleich hell sind.

Unter Umständen spielen auch die während des Versuches aufgetretenen Änderungen der Leuchtdichte und des Sehzeichenkontrastes eine Rolle für die Ergebnisse von HUMMELSHEIM, doch sind seine methodischen Angaben zu unvollständig, um darüber etwas aussagen zu können.

Hätte HUMMELSHEIM mit einem ausreichend großen Testfeld sowie konstantem Kontrast und konstanter Leuchtdichte gearbeitet, so wäre er wohl zu den gleichen Ergebnissen gekommen wie wir.

Ganz Ähnliches gilt für die Arbeiten von P.W.COBB und GEISSLER (1913) und P.W.COBB (1914), die wie HUMMELSHEIM einen Einfluß der Umfeldhelligkeit auf die Sehschärfe postulieren. Auch diese Autoren haben ein zu kleines Testfeld verwendet ($1^{o}35'$ x $2^{o}14'$). Außerdem haben sie die Pupillenweite nicht beachtet. Da mit niedrigen Leuchtdichten gearbeitet wurde, dürfte diese hier allerdings auch nur geringe Bedeutung haben.

H.SCHOBER und H.HUNKER (1965) vertreten ebenfalls die der unseren widersprechende Auffassung von HUMMELSHEIM. Sie projizierten ein Testfeld von 630 asb und fanden im Dunkelraum einen Visus von 1,56. Durch Einschalten der Raumbeleuchtung von 100 asb erhöhte sich der Visus auf 1,69, während der Kontrast der Sehzeichen von 80 % auf 68 % sank. Bei Einschalten eines Scheinwerfers, der 1300 asb im gesamten Gesichtsfeld erzeugte, sank der Sehzeichenkontrast auf 25 %, der Visus blieb dennoch auf 1,60 stehen. Daraus schließen die Autoren auf eine erhebliche Sehschärfeverbesserung auf Grund der besseren Adaptationsbedingungen durch die periphere Belichtung.

In der Versuchsanordnung von SCHOBER und HUNKER werden gleichzeitig vier verschiedene Faktoren verändert: 1) Die Umfeldleuchtdichte, 2) der Kontrast des Sehzeichens zum Testfeld, 3) die Leuchtdichte des Testfeldes, 4) die Pupillenweite.

Der Sehschärfeanstieg von 1,56 auf 1,69 bei Einschalten der Raumbeleuchtung ist sehr gering. Bei der angewandten Methode

(Buchstaben als Testzeichen) sind solche Unterschiede nur statistisch überhaupt fassbar. Die sehschärfeverbessernde Abnahme der Pupillenweite, wie auch die Zunahme der Testfeldleuchtdichte um100 asb sind für die Erklärung einer so geringen Sehschärfesteigerung völlig ausreichend; beide wurden jedoch von den Autoren nicht registriert. Die Kontrastminderung ist in diesem Bereich praktisch ohne Bedeutung, denn nach SCHOBER und MUNKER ergibt selbst eine Kontrastverschlechterung von 8o % auf 5o % nur eine Visusabnahme von 1,0 auf 0,9. Aus der Kurve von E.LUDVIGH (1941) ist für eine Kontrastabnahme von 8o % auf 68 % eine Visusverschlechterung von 0,95 auf 0,93 abzulesen. Auch nach den Ergebnissen von E.AULHORN (1964) ist eine solche Kontrastabnahme zu vernachlässigen.

Das Einschalten des Zusatzscheinwerfers bewirkt durch die Steigerung der Testfeldleuchtdichte um 1/2 log.Dekade in diesem Leuchtdichtebereich eine erhebliche Verbesserung der Sehschärfe, wie wir seit den Versuchen von A.KÖNIG (1897) wissen. Dieser Effekt beruht nach unseren Erfahrungen teils auf einer Empfindlichkeitssteigerung der Retina, teils auf der Abnahme der Pupillenweite (siehe Abb.6 und Abb.11. Den visusverbessernden Faktoren wirkt die Kontrastabnahme auf 25 % entgegen, welche aber viel weniger ins Gewicht fällt, als man bei oberflächlicher Betrachtung annehmen könnte. SCHOBER und MUNKER geben für eine Kontrastverminderung von 8o % auf 20 % eine Visusverschlechterung von 1,0 auf 0,8 an (1/10 log.Dekade). Nach LUDVIGH beträgt die Herabsetzung der Sehschärfe 0,95 : 0,77 (1/10 log.Dekade). Nach den Kurven von AULHORN ist bei diesen Kontrastverhältnissen und einer Testfeldleuchtdichte von 100 asb mit einer Visusverschlechterung von 1,7 : 1,4 (1/10 log.Dekade) zu rechnen, bei einer Testfeldleuchtdichte von 1000 asb mit einer solchen von 1,7 : 1,6 (1/30 log.Dekade).

Insgesamt ist daher bei den Versuchen von SCHOBER und MUNKER keine bedeutende Visusveränderung zu erwarten, auch wenn man von einer Auswirkung des Adaptationszustandes der Peripherie

auf die Sehschärfe absieht. Ihre Ergebnisse lassen sich zwang - los im Sinne unserer Auffassung durch rein lokale Veränderungen der Netzhautempfindlichkeit und eine Verbesserung der optischen Abbildung im Auge infolge der geringeren Pupillenweite erklären.

Anscheinend im Widerspruch mit unseren Ergebnissen steht schließlich noch eine Arbeit von E.HARTMANN (1966), der für wachsende Umfelder zunächst steigende, nach Überschreiten einer optimalen Testfeldgröße aber wieder absinkende Sehschärfe findet, während unsere Kurven vom Maximum an horizontal verlaufen (siehe Abb.6 und Abb.7).

HARTMANN selbst verzichtet auf Grund der Arbeiten von P. MOON und D.E.SPENCER (1945) sowie B.H.CRAWFORD (1940) auf die Hypothese einer Beeinflussung des zentralen Sehens durch die periphere Adaptation. Seine Deutung der negativen Auswirkung sehr kleiner Umfelder (nahezu Testzeichengröße), stimmt im wesentlichen mit der unsrigen überein. Auch hier dürfte der Grenzkontrast den wichtigsten Faktor darstellen. Dafür spricht die Tatsache, daß in HARTMANNs Versuchen die beste Sehschärfe für kleine Testzeichen (8') bei kleinerem Umfeld erreicht wurde als für große Sehzeichen (3,2°), denn, wie oben (S.36) erwähnt, muß die Grenze des Testfeldes einen bestimmten Abstand vom Sehzeichen haben, um Störungen auszuschließen. Die bei stärkerer Beleuchtung beobachtete Verschiebung der Sehschärfeoptima nach größeren Testflächen spricht nicht gegen den Grenzkontrast als Störfaktor, da bei höherer Leuchtdichte seine Einflußzone breiter wird (AULHORN,E. und HARMS,H. 1956).

Allerdings schwankt die Testfeldgröße, bei der HARTMANN die beste Sehschärfe fand, je nach den Versuchsbedingungen sehr stark (3° bis 30°) und reicht bis zu Flächen, bei denen der Grenzkontrast sicher keine Rolle mehr spielen kann. Der entscheidende Faktor dürfte hier vielmehr die Veränderung der Pupillenweite durch das große Testfeld sein. Dafür spricht, daß die Verschiebung des Sehschärfemaximums nach so großen Flächen bei der stärksten von HARTMANN verwendeten Leuchtdichte auftrat,

welche natürlich die größte pupillomotorische Wirkung hat. HARTMANN hält einen Einfluß der Pupillenweite für wahrscheinlich, hat sie aber nicht gemessen.

Im übrigen ist auch die Art des verwendeten Testzeichens von Bedeutung. HARTMANN benutzt eine rotierende Kreisscheibe mit quadratischer Kerbe, die zunächst den Kontrast Null hat, also für die Versuchsperson unsichtbar ist. Die Sehschärfeprüfung geschieht durch Verstärken des Kontrastes, bis das Zeichen erkannt wird. Der Sehzeichendurchmesser beträgt 8' bis $3{,}2^{\circ}$, also ein Vielfaches der Größe des unseren (Zeigerbreite 1'). Ein solches Sehzeichen wird ein größeres Testfeld erfordern, um Störungen durch den Grenzkontrast zu vermeiden. Außerdem beansprucht diese Anordnung die stark flächenabhängige Leuchtdichteunterschiedsempfindlichkeit (AULHORN,E.1964) viel stärker als der Noniuszeiger. Auch aus diesem Grunde könnte zum Erreichen maximaler Sehschärfe ein größeres Testfeld erforderlich sein als unter unseren Versuchsbedingungen.

Warum in HARTMANNs Versuchen die Kontrastempfindlichkeit und damit die Sehschärfe bei weiterer Vergrößerung des Testfeldes absinkt, ist nicht ohne weiteres zu erklären. Er selbst nimmt Schwierigkeiten beim Auffinden des Sehzeichens und Streulichtwirkungen an.

Unsere Versuche schließen eine Veränderung der Sehschärfe durch Streulichtwirkung aus (siehe S.34). Dagegen halten wir, wie HARTMANN, das "Findeproblem" hier für einen wesentlichen Faktor. In einem relativ kleinen Umfeld ist die Mitte, also der Ort, an dem das Testzeichen erscheint, ziemlich genau zu schätzen. Das Sehzeichen wird in diesem Fall wahrgenommen, sobald es für die allerempfindlichsten Sinneszellen der foveola centralis überschwellig wird. Bei zunehmender Größe des Umfeldes wird die Schätzung der Mitte ungenauer. Die Wahrscheinlichkeit der Abbildung des Sehzeichens auf parazentralen Netzhautstellen mit höherer Schwelle wächst mit der Umfeldgröße, und folglich erfordert die Warnehmung des Zeichens bei größerem Umfeld stärkeren Kontrast.

Durch Anbieten eines ständig sichtbaren Fixierpunktes liesse sich dieser Faktor ausschalten. Bei einer Wiederholung der HARTMANNschen Versuche mit einer derart veränderten Versuchsanordnung wäre nach unseren Erfahrungen ein Absinken der Sehschärfe bei großem Testfeld nicht zu erwarten.

Auch HARTMANNs Versuche zwingen also nicht zu einer Revision der Deutung unserer Versuchsergebnisse.

Wir können festhalten: Bei gegebener Testfeldleuchtdichte und unter Ausschluß einer Störung durch den Grenzkontrast, hat die Testfeldgröße ausschließlich über die Steuerung der Pupillenweite Einfluß auf die Sehschärfe. Eine Auswirkung der Belichtung peripherer Retinabezirke auf die Sehschärfe ist nicht nachweisbar.

Die Beziehung zwischen Sehschärfe, Pupillenweite und absoluter Testfeldhelligkeit.

Anhand der Abb.6 haben wir, bei einer Leuchtdichte von 1000 asb, sowohl für die Sehschärfe, wie auch für die Pupillenweite, eine lineare Abhängigkeit vom Logarithmus der Testfeldgröße festgestellt, wobei sich die Sehschärfe direkt proportional, die Pupillenweite umgekehrt proportional zur Testfeldgrösse verhält. Korreliert man nun in einem neuen Koordinatensystem Pupillenweite und Sehschärfe miteinander (Abb.11), so erhält man, wie zu erwarten war, wieder eine Gerade. Die Sehschärfe verhält sich umgekehrt proportional zur Pupillenweite. Die Berechnung des Korrelationskoeffizienten aus unseren Meßdaten ergibt einen Wert von - 0,74. Errechnet man den Korrelationskoeffizienten nicht für das Kollektiv sondern nur für eine einzelne Versuchsperson, so entfällt die interindividuelle Streuung und die Werte liegen noch deutlich höher. In Einzelfällen liegt der Korrelationskoeffizient genau bei -1. Die Abhängigkeit der Sehschärfe von der Pupillenweite steht damit außer Zweifel.

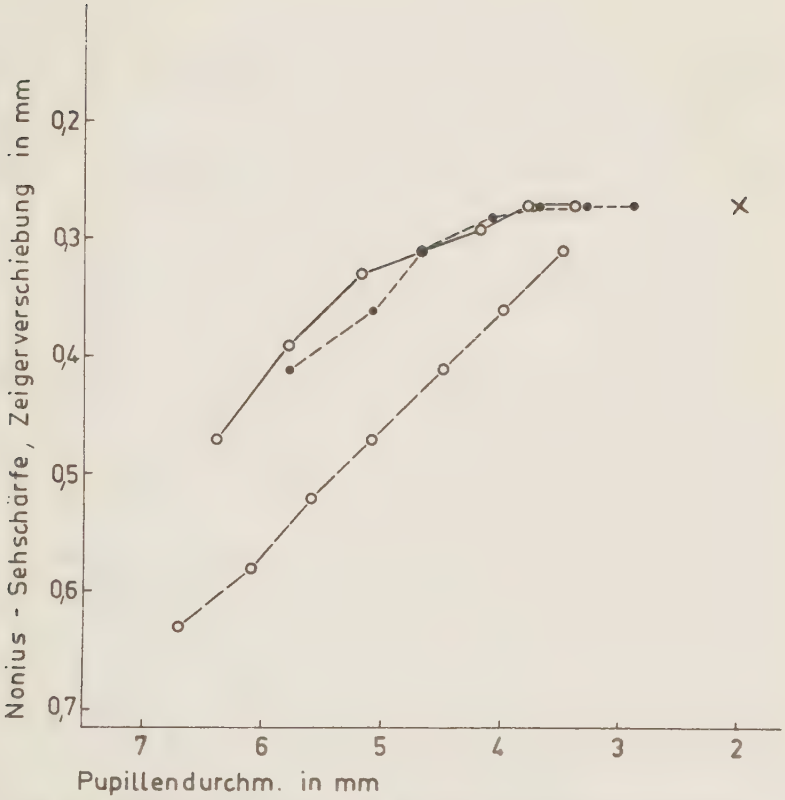

Abb. 11: Beziehung zwischen Pupillenweite und Nonius - Sehschärfe. Mittelwertkurven bei verschiedenen Leuchtdichten. o - - - o 1000 asb, o — o 2000 asb, ● - - - - ● > 2000 asb, x - binokulare Prüfung bei 2000 asb und >2000 asb.

Vgl. Abb. 6

Bei 2000 asb und noch höheren Leuchtdichten gilt diese Beziehung nur bis zum Erreichen des absoluten Sehschärfemaximums. An dieser Stelle biegt die Kurve in eine Abszissenparallele ab. Das bedeutet, daß die Sehschärfe von dieser Grenze an von der Pupillenweite unabhängig ist, da das Sinneszellraster eine weitere Verbesserung des Netzhautbildes nicht mehr erfassen kann. Daher hat auch binokulare Prüfung keine Verbesserung der Sehschärfe zur Folge, obgleich die Pupillen hierbei noch deutlich enger werden als bei monokularer Prüfung.

Den Sinn dieser, bei rein physikalisch-optischer Betrachtung überflüssigen, über das Ziel hinausschießenden Reaktion der Pupille, darf man wohl vor allem im Schutz des Auges vor übermäßiger Beleuchtung sehen. Fehlt dieser Schutz, wie es in unseren Mydriasisversuchen der Fall war, so tritt bei großen Testflächen zunehmend ein subjektiv sehr unangenehmes Blendungsgefühl auf, welches bei hohen Beleuchtungsstärken das Öffnen des Auges fast unmöglich machen kann. Bei empfindlichen Personen ist dementsprechend ein Absinken der Sehschärfe unter diesen Bedingungen zu beobachten (s.S.26). Die Verengung der Pupille dient also auch dann noch der Einstellung optimaler Funktionsbedingungen des Auges, wenn eine Verbesserung der Abbildung nicht mehr verwertet werden kann.

In unseren Versuchen wurde die maximale Sehschärfe im Durchschnitt bei einer Pupillenweite von ca.3,8 mm erreicht, jedoch sind die individuellen Schwankungen recht groß. Ausserdem könnten für ein anderes Sehzeichen, bei welchem die Zerstreuungskreise für die Erkennung eine andere Rolle spielen als beim Noniuszeiger, größere oder kleinere Werte gelten. Ebenso sind die Absolutwerte der Sehschärfe nur auf den von uns verwendeten Zeiger und Kontrast zu beziehen und nicht ohne weiteres mit den Werten anderer Autoren vergleichbar.

Abb.11 zeigt auch den von der Pupillenweite unabhängigen Einfluß der absoluten Testfeldleuchtdichte auf die Sehschärfe. Der gleichen Pupillenweite entspricht bei 2000 asb ein höherer Sehschärfewert als bei 1000 asb. Die Sehschärfeverbesserung bei

Steigerung der Testfeldleuchtdichte beruht folglich, im Gegensatz zu der bei Verkleinerung der Testfläche, nicht nur auf der Abnahme der Pupillenweite, sondern auch auf einer Zunahme der Empfindlichkeit der Sinneszellen. Eine Leuchtdichtesteigerung über 2000 asb hat allerdings keinen Effekt mehr. Die entsprechende Kurve ist mit derjenigen bei 2000 asb praktisch deckungsgleich. Wir dürfen daher annehmen, daß bei 2000 asb die höchstmögliche Empfindlichkeit der Sinneszellen erreicht ist.

Sowohl eine enge Pupille, wie auch eine hohe Testfeldleuchtdichte sind also erforderlich, wenn das Maximum der Sehschärfe erreicht werden soll.

Die gleiche Beziehung zwischen Sehschärfe und Pupillenweite, wie wir, hat F.TONNER (1943) gefunden. Er erzielte unterschiedliche Pupillenweiten unter Ausnutzung der konsensuellen Pupillenreaktion mit Hilfe einer variablen Lichtquelle vor dem nicht untersuchten Auge. Abb.12 zeigt seine Kurve, die zur besseren Vergleichbarkeit entsprechend unserer Darstellungsweise umgezeichnet wurde. Sie ist mit unserer Kurve bei 1000 asb (Abb.11) nahezu identisch. TONNER hat das Testfeld nicht verändert, also auch die belichtete Retinafläche konstant gehalten. Dennoch kommt er zum gleichen Resultat wie wir. Dieses Ergebnis ist ein weiteres starkes Argument für die Wirksamkeit der Pupillenweitenänderung und gegen einen Einfluß des Streulichtes oder des Adaptationszustandes der Peripherie.

Auch die Ergebnisse von E.HUMMELSHEIM (1898) stimmen gut mit den unseren überein. Er untersuchte die Sehschärfe in pharmakologischer Miosis und Mydriasis sowie mit unbeeinflusster Pupille bei verschiedenen Leuchtdichten. Bei hoher Leuchtdichte lagen die Sehschärfewerte von Miosis und physiologischer Pupillenweite nahe bei einander, bei niedriger Leuchtdichte diejenigen von Mydriasis und physiologischer Pupillenweite. Abb.13 zeigt die Kurve von HUMMELSHEIM. Der Abstand der Ordinatenwerte der Kurvenpunkte mit gleichem Abszissenwert kann als Maß für die Wirkung der Pupillenveränderung gelten. Der

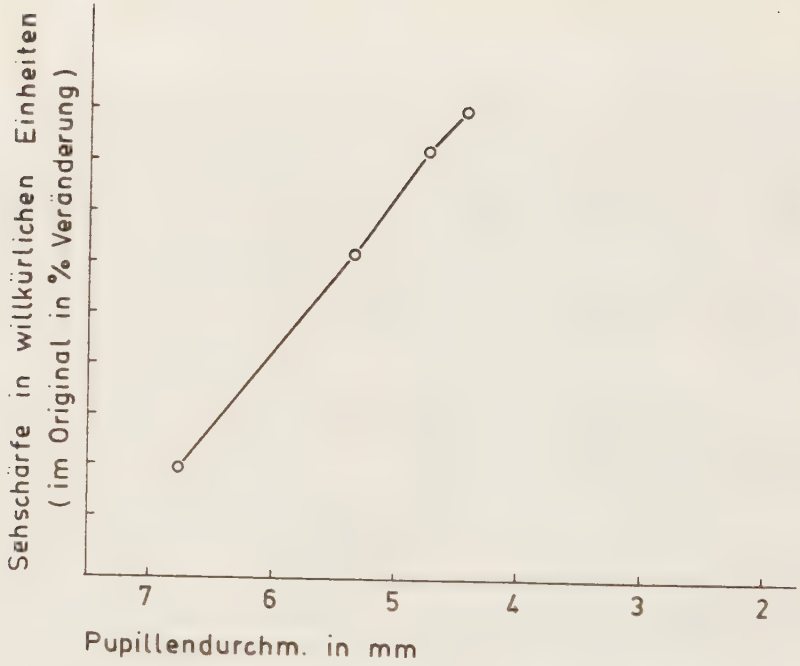

Abb. 12: Abhängigkeit der Sehschärfe vom Pupillendurchmesser nach TONNER. Zum besseren Vergleich in unser Koordinatensystem umgezeichnet.

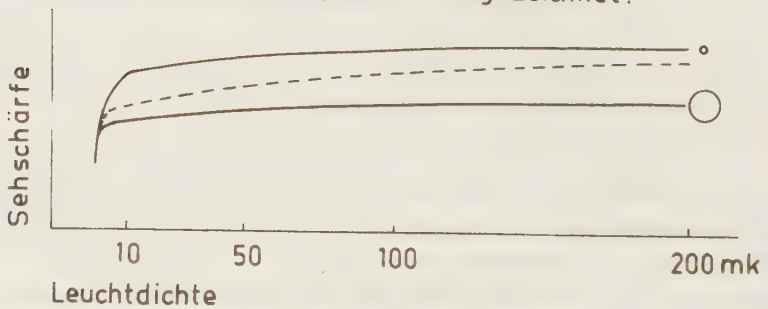

Abb. 13: Abhängigkeit der Sehschärfe von Leuchtdichte und Pupillenweite nach HUMMELSHEIM
∘ Miosis, ○ Mydriasis, - - - unbeeinflusste Pupille

Kurvenabschnitt im Bereich sehr niedriger Leuchtdichten ist natürlich nicht mit unseren Versuchsbedingungen vergleichbar. Hier überwiegt bei enger Pupille der Nachteil zu geringen Lichteinfalles den Vorteil schärferer Abbildung.

Den gleichen Versuch hat mit gleichem Ergebnis auch K. HAYAKAWA (1938) durchgeführt.

Im Gegensatz zu unseren Versuchsergebnissen findet sich in zahlreichen Arbeiten anderer Autoren immer wieder die Angabe, daß die Sehschärfe beim Überschreiten einer "kritischen" Pupillenweite oder einer optimalen Leuchtdichte wieder absinke. Wir können nur feststellen, daß wir unter unseren Versuchsbedingungen keine solche "kritischen" Werte gefunden haben. Unsere engsten Pupillendurchmesser betrugen ca.2 mm, bei Untersuchungen in heller Sommersonne erreichten wir auf dem Testfeld maximale Leuchtdichten von knapp 40000 asb. Es ist denkbar, daß diese Werte noch zu groß, beziehungsweise zu klein sind, um ein Absinken der Sehschärfe zu verursachen.

Zusammenfassend können wir feststellen: Bei einer konstanten mittleren Leuchtdichte, bei welcher der Maximalwert der Sehschärfe nicht erreicht wird, besteht eine lineare, umgekehrt proportionale Abhängigkeit der Sehschärfe vom Pupillendurchmesser. Die Sehschärfe ist außerdem bis zu einer Leuchtdichte von 2000 asb auch von der Höhe der Testfeldleuchtdichte abhängig. Von 2000 asb aufwärts ist die Sehschärfe von der Testfeldleuchtdichte unabhängig. Die Pupillenweite hat ebenfalls nur bis zum Erreichen des absoluten Sehschärfemaximums einen Einfluß. Mit unserem Sehzeichen lag diese Grenze durchschnittlich bei einem Pupillendurchmesser von ca.3,8 mm. Weitere Abnahme des Pupillendurchmessers hat auf die Sehschärfe keine Wirkung mehr. Bis zu einem Pupillendurchmesser von 2 mm und einer Testfeldleuchtdichte von ca.40000 asb ist eine Verschlechterung der Sehschärfe gegenüber dem Maximum nicht nachweisbar.

S c h l u s s f o l g e r u n g e n

Ausgangspunkt der vorliegenden Untersuchung war die Problematik der Standardisierung der klinischen Sehschärfeprüfung.

Aus unseren Versuchen geht eine so starke Abhängigkeit der Sehschärfe von der Pupillenweite hervor, daß als wichtige Voraussetzung einer guten Sehschärfeuntersuchung eine konstante Pupillenweite gefordert werden muß. Auch die große Bedeutung einer sorgfältigen Refraktionsbestimmung wird durch unsere Ergebnisse demonstriert, da sie eindringlich darauf hinweisen, in welch ungünstige und gefährliche Situation zum Beispiel ein bei hellem Tageslicht leidlich sehtüchtiger ametroper Autofahrer bei Dunkelheit geraten kann.

Schon in der Einführung haben wir erwähnt, wie nachteilig sich eine enge Pupille auf die Genauigkeit der Refraktionsbestimmung auswirkt. In der älteren und neueren Literatur gibt es eine Reihe von theoretischen und experimentellen Untersuchungen zu dieser Frage, aus denen ebenfalls hervorgeht, daß ein erheblicher Refraktionsfehler bei enger Pupille völlig übersehen werden kann, weil diese die von dem Brechungsfehler hervorgerufenen Zerstreuungskreise so weit verkleinert, daß dennoch eine brauchbare Abbildung zustande kommt.(COWAN,A. 1955 ; FERREE, C.E. und RAND,G. 1923 ; FERREE,C.E. und RAND,G. 1936 ; GLEICHEN, A. 1917 ; SCHWARTZ,T. und OGLE,K.N. 1959)

Es ist deshalb für die subjektive Refraktionsbestimmung nicht nur ein konstanter, sondern auch ein möglichst großer Pupillendurchmesser zu fordern. Da die Anwendung eines Mydriatikums aus praktischen Gründen nicht immer möglich ist, kann diese Forderung nur durch Verwenden eines Testfeldes erfüllt werden, dessen Fläche zu klein ist, um einen kräftigen pupillomotorischen Reiz auszuüben. Wie wir nachweisen konnten, ist die Sehschärfe von der Testfeldgröße, sofern keine Grenzkontrasterscheinungen

auftreten, unabhängig; es bestehen daher keine Bedenken gegen solche Untersuchungsbedingungen.

Die Höhe der Leuchtdichte hat auf die Refraktionsbestimmung grundsätzlich keinen Einfluß, falls gute Helladaptation und Kontrastempfindlichkeit gewährleistet sind, und keine Blendung auftritt.

Dagegen ist das Leuchtdichteniveau von größter Wichtigkeit für die Prüfung des Funktionszustandes der Macula. Um bei dieser Untersuchung zuverlässige und vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, wäre es wünschenswert, die Retina in den Zustand größtmöglicher Empfindlichkeit zu versetzen. Hierzu ist, wie wir zeigen konnten, eine Leuchtdichte von 2000 asb erforderlich.

Am vorteilhaftesten für die ärztliche Sehschärfeprüfung wäre daher ein Testfeld mit 2000 asb Leuchtdichte, aber nur ca.4° Durchmesser bei im übrigen weitgehend abgedunkeltem Untersuchungsraum. Unter diesen Bedingungen wäre vom Leuchtdichteniveau her die maximale Leistungsfähigkeit des Sinneszellen gewährleistet (siehe Abb.6 und 11), die Pupille wäre aber noch weit genug, um die Refraktionsbestimmung nicht zu beeinträchtigen (siehe Abb.6).

Eine gesonderte Frage sind Berufseignungsteste. Für Berufe, die ungewöhnliche Beleuchtungsbedingungen bieten (Bergleute, Nachtausguck der Marine) wird es zweckmäßig sein, möglichst unter den am Arbeitsplatz gegebenen Beleuchtungsverhältnissen zu prüfen. Will man dagegen die maximal erreichbare Sehschärfe eines Probanden erfahren, so muß man nicht nur für ausreichende Leuchtdichte des Testfeldes (mindestens 2000 asb), sondern auch für eine enge Pupille sorgen. In diesem Falle ist daher ein großes, helles Testfeld (mindestens 57° Durchmesser) erforderlich.

Zusammenfassung

Um dem Ziel einer standardisierten Methode der klinischen Sehschärfeprüfung näher zu kommen, erscheint eine Untersuchung über die Beziehung zwischen Sehschärfe, Pupillenweite und Testfeldgröße angebracht.

In einem gleichmäßig ausgeleuchteten Raum wird die Testfeldgröße durch vor das Auge gesetzte Rohre verändert. Die Pupillenweite wird durch Blitzlichtphotographie am nicht untersuchten Auge gemessen. Die Sehschärfe wird mit Landoltringen und mit einem Noniuszeiger bestimmt.

Aus den Ergebnissen werden nach Auseinandersetzung mit der einschlägigen Literatur folgende Schlüsse gezogen:

Bei konstanter Testfeldleuchtdichte ist der Pupillendurchmesser dem Logarithmus der Testfeldgröße umgekehrt proportional, sofern keine Minimal- oder Maximalwerte des Pupillendurchmessers erreicht werden.

Die Sehschärfe ist bei nicht medikamentös beeinflußter, physiologischer Pupillenweite dem Logarithmus der Testfeldgröße direkt proportional. Bei künstlich konstant gehaltener Pupillenweite besteht keine Abhängigkeit der Sehschärfe von der Testfeldgröße. Damit ist ein Einfluß des Adaptationszustandes peripherer Netzhautbereiche auf die Sehschärfe ebenso ausgeschlossen, wie eine sehschärfeverändernde Wirkung vermehrten Streulichtes im Auge. Dagegen ist die Sehschärfe linear und umgekehrt proportional vom Pupillendurchmesser abhängig. Die Testfeldgröße hat, sofern keine Grenzkontrasterscheinungen auftreten, nur über die Steuerung der Pupillenweite Einfluß auf die Sehschärfe.

Die Sehschärfe erreicht bei 2000 asb und einer individuell verschiedenen Pupillenweite ein Maximum, das weder durch weitere Steigerung der Leuchtdichte, noch durch weitere Abnahme der Pupillenweite überschritten werden kann.

Für die subjektive Refraktionsbestimmung wird ein konstanter und möglichst großer Pupillendurchmesser gefordert, die Funktionsprüfung der Macula dagegen verlangt vor allem eine hohe Testfeldleuchtdichte. Beide Forderungen können durch ein Testfeld von ca. 4° Durchmesser mit einer Leuchtdichte von 2000 asb im abgedunkelten Raum erfüllt werden.

Literatur

Aguilar, M. (1955) — Sur la sommation binoculaire. Optica Acta (Paris) 2, 1o5 (1955)

Aulhorn,E, (1964) — Über die Beziehung zwischen Lichtsinn und Sehschärfe. Graefes Arch. 167 , 4-74 (1964)

Aulhorn,E. und Harms,H. (1956) — Untersuchungen über das Wesen des Grenzkontrastes. Ber.dtsch.ophthalm.Ges.Heidelberg 60, 7-10 (1956)

Becker,W. (1957) — Statistische Untersuchungen der Pupillenweiten in Abhängigkeit von der Lichtintensität. Z.Biol. 1o9, 81-85 (1957)

Best,F. (1900) — Über die Grenze der Erkennbarkeit von Lageunterschieden. Graefes Arch. 51, 453-460 (1900)

Blackwell,R. (1952) — Studies of psychophysical methods for measuring visual threshholds. J.Opt.Soc.Amer. 42, 606-616 (1952)

Bouma,P.J. (1936) — Acuité visuelle et vitesse de perception dans l'etude de l'éclairage des routes. Revue technique Philips 1 ,215-220 (1936)

BOUMAN,M.A. (1955) — On foveal and peripheral interaction in binocular vision. Optica Acta (Paris) 1, 177-183 (1955)

BRAJLOWSKY,S. (1925) — Über die Abhängigkeit der Sehschärfe von der Pupillenweite. Klin.Mbl.Augenhk. 74 ,242 (1925)

Cobb,P.W. u.Geissler (1913) — The effect on foveal vision of bright surroundings I. Psychol.rev. 2o ,425-447 (1913)

Cobb,P.W. (1914) — The effect on foveal vision of bright surroundings II. Psychol.rev. 21, 23-32 (1914)

Cobb,P.W. (1915)
The influence of pupillary diameter on visual acuity
Amer.J.Physiol. 36 ,335-346 (1915)

Cowan,A. (1955)
The role of the pupil in ametropia
Amer.J.Ophthal. 4o ,481-485 (1955)

Crawford,B.H. (1937)
The dependence of pupil size upon external light stimulus under static and variable conditions
Proc.Roy.Soc.London B 121, 376-395 (1937)

Crawford,B.H. (1940)
The effect of field size and pattern on the change of visual sensitivity with time
Proc.Roy.Soc.London B 129, 94-103 (1940)

ten Doesschate,J. (1955)
Visual acuity and illumination
Aeromed.Acta (Soesterberg) 4,127-137 (1955)

ten Doesschate,J. u.Alpern,M. (1965)
Response of the pupil to steady state retinal illumination: Contribution by cones
Science 149 , 989-991 (1965)

ten Doesschate,J. u.Alpern,M. (1967a)
Effect of photoexcitation of the two retinas on pupil size
J.Neurophysiol. 30, 562-576 (1967)

ten Doesschate,J. u.Alpern,M. (1967b)
Influence of asymmetrical photoexcitation of the two retinas on pupil size
J.Neurophysiol. 30, 577-585 (1967)

Dreyer,V. (1964)
On the exaktness of visual acuity determination with decimal, snellen and logarithmic notation
Acta ophthal.(Kopenhagen) 42, 295-306 (1964)

Drischel,H. (1957)
Untersuchungen über die Dynamik des Lichtreflexes der menschlichen Pupille
Pflügers Arch. 264, 145-169 (1957)

Ferree,C.E. (1940)
The projection method of presenting the test object for testing visual acuity
Amer.J.Ophthal. 23, 882-884 (1940)

Ferree,C.E.u.Rand,G. (1923) — The effect of increase of intensity of illumination on acuity, and intensity of illumination of test charts. Amer.J.Ophthal. 6 ,672-675 (1923)

Ferree,C.E.u.Rand,G. (1936) — Intensity of light in relation to the examination of the eye. Brit.J.Ophthal. 20 ,331-346 (1936)

Fisher,M.B. (1938) — The relationship of the size of the surrounding field to visual acuity in the fovea. Journ.exper.Psychol. 23 ,215-238 (1938)

Flamant,F. (1948) — Variation du diamétre de la pupille de l'oeil en fonction de la brillance. Rev.Opt. 27 ,751-758 (1948)

Foxell,C.A.P.u.Stevens,W.P. (1955) — Measurements of visual acuity. Brit.J.Ophthal. 39, 513-533 (1955)

Fugate, J.M. (1954) — A masking technique for isolating the pupillary response to focussed light. J.Opt.Soc.Amer. 44 , 771-779 (1954)

Fujisaki,S. (1959) — The effect of pupillary size and illumination on visual acuity. Acta Soc.ophthal.jap. 63, 2841-2866 (1959) mit engl.Zus.fassung, jap.

Gilbert,M. u.Hopkinson,R.G. (1949) — The illumination of the Snellen chart. Brit.J.Ophthal. 33 ,305-310 (1949)

Gleichen,A. (1917) — Beitrag zur Theorie der Sehschärfe. Graefes Arch. 93, 303-356 (1917)

Guillery, H. (1931) — Sehschärfe. in Hdb.der Physiologie, XII/2, 745-811 Berlin 1931

Gullberg,J.E. u. Wagmann (1942) — The relationship between monochromatic light and pupil diameter. The low visibility curve as measured by pupillary measurements. Amer.J.Physiol.137, 769 (1942)

Harms,H. u.Aulhorn,E. (1955) — Studien über den Grenzkontrast I.Mitt. Ein neues Grenzphänomen. Graefes Arch. 157 , 3-23 (1955)

Hartinger, H. (1937)
Pupillenweiten
Z.ophthalm.Opt.25 , 1-7 (1937)

Hartmann,E. (1966)
Der Einfluß der Umfeldgröße auf die Detailwahrnehmung
Lichttechnik 18, 79-81 (1966)

Hayakawa, K. (1938)
Studies on brightness, the size of pupil and visual acuity
Acta Soc.ophthal.jap. 42, 1356-1372 (1938) mit engl.Zusammenfass. 97-98, jap.

Hering E. (1899)
Über die Grenzen der Sehschärfe
Ber.sächs.Ges.Wiss.Math.-physikal. Kl.51, 16-24 (1899)

Hummelsheim,E. (1898)
Über den Einfluß der Pupillenweite auf die Sehschärfe bei verschiedener Intensität der Beleuchtung
Graefes Arch.45, 357-373 (1898)

Hummelsheim, E. (1900)
Centrale Sehschärfe und periphere Helligkeit
Ber.Ophthalm.Ges.Heidelberg 28, 137-144 (1900)

Humphris, D. u. Orth, D. (1958)
Periodic refraction fluctations in the healthy eye.
Brit.J.Physiol.Opt.N.S. 15 , 30-44 (1958)

Jaeger, A. (1947)
Grenzen der Sehschärfe
Klin.Mbl.Augenhk. 112, 244-251 (1947)

Jaeger, W. (1952)
Über den Einfluß der Darbietungszeit auf das minimum separabile
Klin.Mbl.Augenhk. 121, 340-345 (1952)

Katz,J. (1947)
Ein neues Verfahren zur genauen Bestimmung der Sehschärfe
Klin.Mbl.Augenhk. 112, 341-346 (1947)

Kikkawa, T. (1935)
Die Studien über den Einfluß der Pupillenweite auf die Sehschärfe
Acta Soc.ophthalm.jap. 39, 1450-1475 (1935) mit dtsch.Zusammenfassung 1o8-1o9 jap.

König, A. (1897)
Die Abhängigkeit der Sehschärfe von der Beleuchtungsintensität
Sitz.Ber.Preuss.Akad.Wiss. 26, 559-572 (1897)

Kravkov, S.V. (1934)
Changes of visual acuity in one eye under the influence of the illumination of the other
J.exper.Psychol. 17, 805-812 (1934)

Lapicque, C. (1936)
L'image retinienne d'un point éloigné pour differentes grandeurs de la pupille
C.r.Acad.Sci.(Paris) 202, 656-659 (1936)

Löwenstein, O. u. Friedmann, E.D. (1942)
Pupillographic Studies
Arch.Ophthal.(Chicago) 27 ,969-993 (1942)

Ludvigh, E. (1941)
Effect of reduced contrast on visual acuity as measured with Snellen test letters
Arch.Ophthal.(Chicago) 25, 469-474 (1941)

Melanowsky, W.H. (1935)
L'éclairage optimal pour l'aptitude visuelle maximale
Bull.internat.Acad.pol.Sci.(Cracovie) Cl.Med. 7, 703-715 (1935)

Monjé, M. (1949)
Die Abhängigkeit der Sehschärfe von der Darbietungszeit
Ber.Dtsch.Ophthalm.Ges.Heidelberg 55, 270-272 (1949)

Moon, P.u.Spencer, D.E. (1945)
The visual effect of non - uniform surrounds
J.Opt.Soc.Amer. 35, 233-248 (1945)

Petersen, P. (1956)
Die Pupillographie und das Pupillogramm
Acta physiol.scand. 37, Suppl.125, 1 (1956)

Reeves, P. (1918)
Rate of pupillary dilation and contraction
Psychol.Rev. 25, 330-340 (1918)

Röhler, R. (1962)	Erklärung der Sehschärfe und der Kontrastschwelle für kleine Objekte aus den optischen Abbildungseigenschaften der Augenmedien. Optic 19, 519-534 (1962)
Schober,H. (1957)	Das Sehen Leipzig 1957
Schober,H. u. Munker, H. (1965)	Bestimmung der Sehschärfe und ihre Reproduzierbarkeit Klin.Mbl.Augenhk. 146, 210-216 (1965)
Schwartz, T. u.Ogle, K.N. (1959)	The depth of focus of the eye Arch.Ophthalm.(Chicago) 61, 578-588 (1959)
Thomson, L.C. (1947)	Binocular summation within the nervous pathways of the pupillary light reflex. J.Physiol.(London) 106, 59-65 (1947)
Tonner, F. (1943)	Die sphärische Aberration als begrenzender Faktor der Abbildungsschärfe. Pflügers Arch. 247, 160-167 (1943)
Wagmann u. Nathanson (1942)	Influence of intensity of white light upon pupil diameter of the human and of the rabbit Proc.Soc.Exptl.Biol.Med. 49, 466-470 (1942)
Westheimer,G. (1964)	Pupil size and visual resolution Vision Research 4, 39-45 (1964)
Wülfing E.A. (1892)	Über den kleinsten Gesichtswinkel Z.Biol. 11 , 199-202 (1892)
Zanen, M.J. u. Klaassen-Nenquin (1957)	Acuité visuelle en fonction du temps d'exposition Bull.soc.belge Ophthal. 114, 574-581 (1957)

Meiner verehrten Lehrerin, Frau Professor Dr. Elfriede Aulhorn, danke ich aufrichtig für die in jeder Hinsicht vorzügliche und angenehme Arbeitsmöglichkeit unter ihrer stets freundlichen und hilfsbereiten Anleitung.

Allen Versuchspersonen, vor allem Fräulein Dietlinde Aulhorn, danke ich herzlich für ihre unentbehrliche Mitarbeit.

Auch der Werkstatt der Augenklinik schulde ich Dank für die Hilfe beim Aufbau der Versuchsapparatur.

L e b e n s l a u f

Am 4. Januar 1939 wurde ich, Gunter Dietrich S c h ö c h , als zweiter von drei Söhnen des Studienrates Theodor Christian Schöch und seiner Frau Margarete, geb. Feuer in Aiud/Siebenbürgen geboren.

Die Umsiedlung der Volksdeutschen führte unsere Familie 1940 nach Saybusch in Oberschlesien. 1945 endete die Flucht für uns in Kreuzstraßl/Bay.Wald.

Von April 1946 bis Juli 1950 besuchte ich die Volksschule Ludwigsthal, von September 1950 bis Dezember 1951 die Oberrealschule in Landshut, ab Januar 1952 das Kepler - Gymnasium in Ulm, wo ich im März 1959 die Reifeprüfung bestand.

Das Sommersemester 1959 und das Wintersemester 1959 / 60 verbrachte ich am Leibniz - Kolleg der Universität Tübingen.

Vom 1. April 1960 bis zum 31. März 1961 leistete ich den Grundwehrdienst ab.

Im Sommersemester 1961 begann ich das Studium der Medizin in Tübingen, ging nach dem Vorphysikum nach Kiel und kehrte nach bestandenem Physikum im Wintersemester 1963 / 64 nach Tübingen zurück, wo ich im Wintersemester 1966 / 67 das Staatsexamen ablegte.

Vom 1.März 1967 bis zum 29.Februar 1968 habe ich an der Universitäts - Augenklinik in Tübingen hauptsächlich an der vorliegenden Dissertation gearbeitet.

Seit dem 1. März 1968 bin ich an der Inneren Abteilung des Stadtkrankenhauses Siegen als Medizinalassistent tätig.